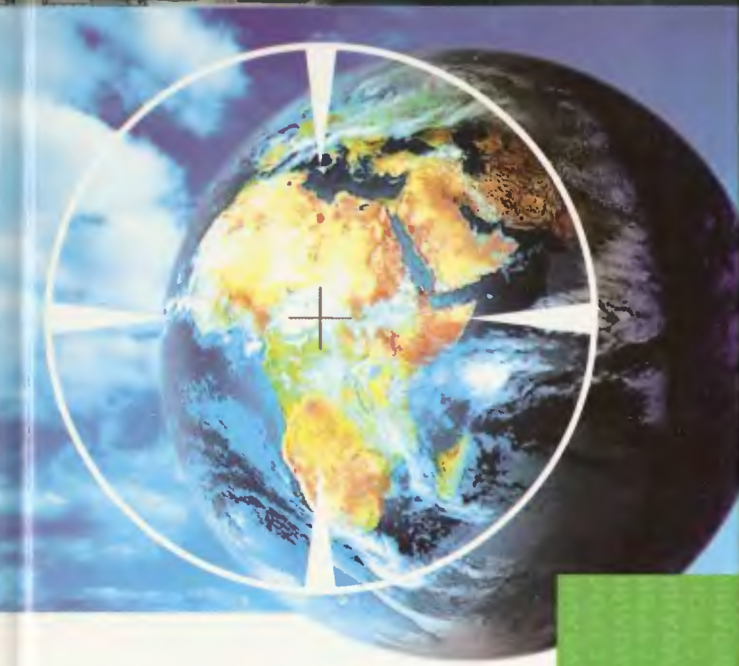
СТРОИТЕЛЬСТВО и ДИЗАЙН



Справочник современного изыскателя

ФЕНИКС

Скан страницы отсутствует

УДК 528
ББК 26.1
КТК 160
С74

Авторы:

Маилян Л.Р., заслуженный строитель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; ***Куштин М.Ф.***, заслуженный деятель наук Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; ***Куштин В.М.***, доктор технических наук, профессор; ***Толкачев А.В.***, доктор наук, профессор; ***Таржиманов Э.А.***, кандидат технических наук, доцент; ***Михайлов М.М.***, инженер; ***Новосельцев М.В.***, инженер; ***Скнарина Н.А.***, инженер; ***Маилян А.Л.***, инженер; ***Щеглов А.А.***, инженер

С74 **Справочник современного изыскателя** / Под общ. ред. Л.Р. Маиляна. — Ростов н/Д : Феникс, 2006. — 590, [1] с. : ил. — (Строительство и дизайн).
ISBN 5-222-09881-8

В последние годы претерпели заметные изменения теория и практика инженерно-геодезических, инженерно-геологических и других инженерных изысканий. Появились новые методы и методики, приборы и оборудование, обновились нормативные документы. В предлагаемом справочнике представлено краткое изложение основных сведений о различных современных инженерных изысканиях для широкого спектра целей практической деятельности.

ISBN 5-222-09881-8

УДК 528
ББК 26.1

© Коллектив авторов, 2006
© Изд-во «Феникс»: оформление, 2006

Справочное издание

МАИЛЯН Левон Рафаэлович, КУШТИН Иван Федорович, КУШТИН Владимир Иванович, ТОЛКАЧЕВ Александр Васильевич, ТАРЖИМАНОВ Эдгар Альбертович, МИХАЙЛОВ Михаил Михайлович, НОВОСЕЛЬЦЕВ Максим Владимирович, СКНАРИНА Надежда Анатольевна, МАИЛЯН Александр Левонович, ЩЕГЛОВ Анатолий Анатольевич

СПРАВОЧНИК СОВРЕМЕННОГО ИЗЫСКАТЕЛЯ

Ответственные редакторы *Оксана Морозова, Наталья Калиничева*
Технический редактор *Галина Логвинова*
Корректор *Алла Багдасарян*
Компьютерная верстка: *Андрей Басов*

Сдано в набор 10.05.2006. Подписано в печать 24.08.2006.
Формат 60×90$^{1}/_{16}$. Бумага типографская № 2.

Тираж 4 000 экз. Заказ № 3454.

Издательство «Феникс»
344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80.
Тел.: (863) 261-89-76, тел./факс: 261-89-50. E-mail: morozovatext@aaanet.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «ИПП «Курск»
305007, г. Курск, ул. Энгельса, 109.
E-mail:kursk-2005@yandex.ru
www.petit.ru

Качество печати соответствует качеству представленных диапозитивов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы претерпели заметные изменения теория и практика инженерно-геодезических, инженерно-геологических и других инженерных изысканий. Появились новые методы и методики, приборы и оборудование, обновились нормативные документы.

Вместе с тем, в последние годы наблюдается и определенный информационный застой — очень снизилось количество изданий технической литературы, в особенности по специальным инженерным вопросам.

В связи с этим, в предлагаемом справочнике представлено краткое изложение основных сведений о различных современных инженерных изысканиях для широкого спектра целей практической деятельности.

В связи с ограниченным объемом справочника в нем нашли свое отражение не все вопросы инженерных изысканий, а лишь наиболее востребованные практикой. Однако, с целью компенсации, в справочнике приводится обширный список литературы, в том числе нормативной, в которой можно найти более подробные сведения по интересующим вопросам.

Справочник содержит следующие разделы:

1. Инженерно-геодезические изыскания.
2. Инженерно-геологические изыскания.
3. Инженерно-гидрологические изыскания.
4. Инженерно-гидрологические изыскания режима и баланса подземных вод.
5. Изыскания грунтовых строительных материалов.
6. Геофизические, гидрохимические, радиогидрологические и другие виды исследований.

В конце книги приводится список литературы ко всем разделам.

Справочник снабжен большим количеством справочных таблиц, графиков и рисунков. В нем изложены и процитированы основные положения действующих нормативных документов.

Раздел 1 написан д-ром техн. наук, проф. *И.Т. Куштиным* и д-ром техн. наук, проф. *В.И. Куштиным*, раздел 2 — инж. *М.М. Михайловым*, канд. техн. наук, доц. *Э.А. Таржимановым*, инж. *А.А. Щегловым*, разделы 3 и 4 — инж. *М.М. Михайловым* и инж. *М.В. Новосельцевым*, раздел 5 — д-ром техн. наук, проф. *Л.Р. Маиляном*, инж. *М.В. Новосельцевым*, инж. *М.М. Михайловым* и инж. *А.Л. Маиляном*, раздел 6 — д-ром наук, проф. *А.В. Толкачевым*, инж. *Н.А. Скнариной* и инж. *М.М. Михайловым*.

Раздел 1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Глава 1.1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЕТЬ

1.1.1. Геодезические сети, их назначение, классификация

Геодезической сетью называют систему закрепленных на земной поверхности геометрически связанных между собой точек, положение которых определено в принятой системе координат и высот. Геодезические сети подразделяют на глобальные, покрывающие поверхность всей Земли; национальные (государственные), создаваемые на территории данной страны; сети сгущения, геодезическое съемочное обоснование (для топографических съемок); специальные (местные) геодезические сети. При построении геодезических сетей соблюдается принцип перехода от общего к частному и систематический контроль всех видов работ.

Глобальная геодезическая сеть создается методами космической геодезии по материалам наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ). Положение пунктов определяется в геоцентрической системе прямоугольных координат с началом в центре масс Земли, ось Z совпадает с осью вращения Земли, плоскость XZ — с плоскостью начального меридиана, ось OY дополняет систему до правой. Глобальную геодезическую сеть используют для решения научных и научно-технических задач геодезии, геофизики, астрономии и других наук, например для уточнения фундаментальных геодезических постоянных, изучения фигуры и гравитационного поля Земли, определения перемещения и деформации литосферных плит земной коры и т. п. Глобальная геодезическая сеть должна непрерывно совершенствоваться путем повышения точности определения координат ее пунктов, что необходимо для более эффективного решения традиционных и новых научных проблем геодезии и других наук.

Национальная геодезическая сеть подразделяется на государственную плановую, нивелирную (высотную) и гравиметрическую сети. Государственная геодезическая сеть (ГГС) состоит из пунктов, взаимное плановое положение которых определяют с наивысшей точностью, достигнутой в массовых измерениях, высоты пунктов этой сети, особенно в горах, определяют с меньшей точностью.

Государственная нивелирная сеть содержит пункты, высоты которых относительно поверхности квазигеоида определяют с наивысшей точностью, плановое положение этих пунктов определяют приближенно.

Государственная гравиметрическая сеть имеет пункты, на которых с наивысшей точностью определяют ускорение силы тяжести, плановое и высотное положение этих пунктов определяют с требуемой точностью.

Государственные геодезические сети необходимы для распространения единой системы координат и высот на территории страны, детального изучения фигуры и гравитационного поля Земли и их изменений во времени, выполнения топографических съемок в единой системе координат и высот, надежного контроля качества топографо-геодезических работ, решения научных и технических задач народного хозяйства.

Специальные (местные) геодезические сети создают в тех случаях, когда для решения поставленных задач на данном участке нужно иметь пункты, взаимное расположение которых в плане и по высоте определено с наивысшей точностью. Систему координат в таких сетях обычно подбирают так, чтобы редукционные поправки за переход от измеренных величин к их проекциям на местную поверхность относимости были минимальными. Такие сети строят, например, в сейсмоактивных регионах для прогнозирования землетрясений, при строительстве крупных сооружений и т. п.

1.1.2. Необходимая плотность и точность построения государственной геодезической сети

Для решения одной из основных задач геодезии, связанной с детальным изучением фигуры Земли, конкретно — поверхности квазигеоида, целесообразно иметь сплошную астрономо-геодезическую сеть на всей территории страны, причем, в горных районах, вследствие более сложного гравиметрического поля и более сложной поверхности квазигеоида, астрономо-геодезическая сеть должна быть более плотной.

Для картографирования территории страны плотность пунктов зависит от масштаба съемки и методов создания геодезического съемочного обоснования. Положим, что геодезическая сеть 1–4-го классов состоит из равносторонних треугольников с длинами сторон s_1, s_2, s_3, s_4, где индексы 1, 2, 3, 4 соответствуют классу сети. Геодезическая сеть 1-го класса (рис. 1.1) состоит из равносторонних треугольников *ABC* и *BCD* со сторонами s_1. Сеть 2-го класса, построенная в виде вставок-пунктов в центры треугольников 1-го класса, состоит из равносторонних треугольников *A*12, *A*23, *2C*3 и т. д., стороны которых

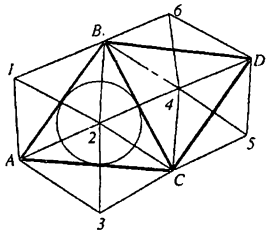


Рис. 1.1. Сеть триангуляции

$s_2 = s_1/2\sin 60° = s_1/\sqrt{3} = 0{,}577s.$ Пункты 3-го класса, находящиеся в центрах треугольников 2-го класса, имеют стороны $s_3 = s_2/\sqrt{3} = s_1/3 =$, $= 0{,}333s_1$ аналогично $s_4 = s_3/\sqrt{3} = 0{,}192s_1$. Приняв s_1 = = 22,5 км, получим s_2 = 0,577 · 22,5 = 13,0 км; s_3 = = 0,333 · 22,5 = 7,5 км; s_4 = 0,192 · 22,5 = = 4,3 км.

Допустим, что каждый пункт обслуживает участок, ограниченный окружностью с радиусом r, равным половине расстояния s между пунктами, т. е. $r = s/2$. Площадь P этого круга равна

$$P = \pi r^2 = \pi s^2/4 = 0{,}78s^2. \qquad (1.1)$$

Откуда

$$s = 2\sqrt{\frac{P}{\pi}} = 1{,}13\sqrt{P} \approx \sqrt{P}. \qquad (1.2)$$

По формуле (1.1) можно вычислить площадь, обслуживаемую одним пунктом. Подставляя вычисленные значения s_1, s_2, s_3, s_4, находим $P_1 = 0{,}785 \cdot 22{,}5^2 =$ = 397,4 км^2; $P_2 = 0{,}785 \cdot 13{,}0^2 = 132{,}7$ км^2; $P_3 = 0{,}785 \cdot 7{,}5^2 =$ 44,2 км^2; $P_4 = 0{,}785 \cdot 4{,}3^2 =$ = 14,5 км^2, где P_1, P_2, P_3, P_4 — площадь, обслуживаемая одним пунктом 1, 2, 3, 4-го классов соответственно.

В реальных условиях треугольники могут отличаться от равносторонних, но в среднем для большой территории полученные выше соотношения между сторонами должны примерно соблюдаться.

При выполнении этих соотношений среднее число n_i пунктов i класса на площади P можно определить по формулам

$$n_1 = P/P_1;\ n_2 = P/P_2 - n_1;\ n_3 = P/P_3 - n_1 - n_2;$$

$$n_4 = P/P_4 - n_1 - n_2 - n_3. \qquad (1.3)$$

Например, для участка 200 км × 200 км = 40000 км^2 имеем $n_1 = 101$; n_2 = = 200; $n_3 = 604$; $n_4 = 1854$ пунктов 1, 2, 3, 4-го классов соответственно. Число пунктов всех классов $N = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = 2759$.

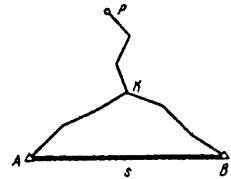


Рис. 1.2. Схема расположения точки P съемочного обоснования и пунктов A и B опорной геодезической сети

Для решения научных проблем геодезии (детальное изучение фигуры Земли и ее гравитационного поля) астрономо-геодезическую сеть, как отмечалось, нужно создавать с наивысшей точностью, достигнутой при массовых измерениях. При картографировании территории страны, выполняемой поэтапно в масштабах 1:100 000–1:50 000, 1:25 000–1:10 000, 1:5000–1:2000 (картографирование нашей страны в масштабе 1:100 000 завершено в конце 50-х годов, в масштабе 1:25000 — в 80-х годах) государственная геодезическая сеть по точности должна обеспечивать топографическую съемку наиболее крупного масштаба, т. е. масштаба 1:2000.

Геодезической основой для создания топокарт служат точки P съемочного обоснования, координаты которых определяют относительно ближайших пунктов, например A, B, государственной геодезической сети (рис. 1.2). Ошибка m_p определения координат точки P и ошибка m_H ее нанесения на топокарту не должны превышать графическую точность топокарты, характеризуемую средней квадратической ошибкой $m \le 0{,}2$ мм. Используя принцип равных влияний, находим

$$m_p = m_H = \left(m/\sqrt{2}\right)M, \tag{1.4}$$

где M — знаменатель масштаба топографической карты (фотоплана).

Координаты точки K, опорной для съемочного хода KP, должны быть определены с ошибкой m_K не более $m_p/2$, а координаты пункта A, исходного для определяемых координат точки K, с ошибкой m_A, не более $m_K/2$, т. е.

$$m_K \le m_p/2;\ m_A = m_K/2 = m_p/4. \tag{1.5}$$

Принимая $m_A = m_B$, для определения средней квадратической ошибки m_S длины стороны $S = AB$ между смежными пунктами государственной геодезической сети с учетом формул (1.5) и (1.4) имеем

$$m_S = m_A\sqrt{2} \le \left(m_p\sqrt{2}\right)/4 = (mM)/4.$$

По этой формуле при $m = 0{,}2$ мм получим

M	10 000	5000	2000	1000
m_s, м	0,50	0,25	0,10	0,05

1.1.3. Основные методы построения государственной геодезической сети

Основными методами создания государственной геодезической сети являются триангуляция, полигонометрия, трилатерация и спутниковые координатные определения. Выбор конкретного метода определяется условиями местности, требуемой точностью и экономической эффективностью.

Триангуляция. Считают, что метод триангуляции предложен в 1614 г. Снеллиусом. На командных высотах устанавливают геодезические пункты, соединяя которые, получают треугольники (рис. 1.3). В сети треугольников известными являются координаты пункта A, базис s и дирекционный угол α стороны AB или координаты пунктов A и B. На пунктах триангуляции в треугольниках измеряют горизонтальные углы. Вычислив дирекционные углы и длины сторон треугольников, определяют координаты всех пунктов сети.

Сеть триангуляции может состоять из рядов треугольников, системы рядов или сплошной сети треугольников. Элементами сети могут быть треугольники, геодезические четырехугольники и центральные системы: *CDEF* — геодезический четырехугольник, *ABDFHA* — центральная система с пунктом C внутри нее.

Полигонометрия. На местности строят геодезические пункты, которые соединяют между собой одиночным ходом или системой ходов, в которых измеряют длины сторон s_i, соединяющие пункты, и на пунктах — углы поворота β_i. Конечные пункты полигонометрии являются опорными, и на них измеряют примычные углы β_0 и β_n между твердыми и определяемыми сторонами, для твердых сторон известны дирекционные углы или азимуты. В крупных городах, в залесенной местности и т. п. метод полигонометрии может быть более эффективным, так как требует менее высоких геодезических знаков, с которых нужно обеспечить видимость на гораздо меньшее

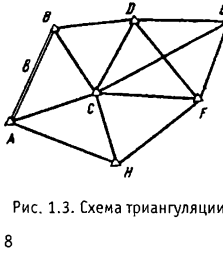


Рис. 1.3. Схема триангуляции

число пунктов, чем в триангуляции и трилатерации (в среднем на постройку знаков приходится 50–60% всех затрат, их стоимость возрастает примерно пропорционально квадрату увеличения высот). Недостатками полигонометрии по сравнению с триангуляцией являются: меньшая жесткость геометрического построения, меньшее число условных уравнений, слабый контроль полевых измерений, обеспечение узкой полосы местности.

Трилатерация, как и триангуляция, состоит из цепочки треугольников, геодезических четырехугольников, центральных систем, сплошных сетей треугольников, в которых измеряют длины сторон. Исходными в трилатерации являются координаты одного или нескольких пунктов, а также дирекционные углы одной или нескольких сторон. Совершенствование и повышение точности свето- и радиодальномеров увеличивает роль трилатерации, особенно в инженерно-геодезических работах.

При создании государственных сетей 1 и 2-го классов метод трилатерации не применяют, так как: 1) контроль измерения сторон или отсутствует, или очень слаб (в треугольниках трилатерации условные уравнения отсутствуют, в геодезических четырехугольниках и центральных системах возникает только по одному условному уравнению); 2) в технико-экономическом отношении трилатерация по сравнению с триангуляцией требует больших транспортных расходов, больший штат бригады, так как для измерения линий нужно на соседних пунктах устанавливать отражатели и с переездом со светодальномером на другой пункт нужно перевозить рабочих с отражателями на другие пункты; 3) точность передачи азимутов в рядах и сетях трилатерации ниже, чем в триангуляции при соизмерении точности линейных и угловых измерений; 4) поперечный сдвиг в трилатерации в несколько раз больше продольного, что приводит к неодинаковой точности определения координат x и y.

Линейно-угловые геодезические сети. В этих построениях измеряют углы и стороны треугольников, на некоторых линиях для ориентирования определяют азимуты Лапласа. Линейно-угловые сети создают для достижения максимальной точности определения координат пунктов, но они требуют гораздо больших затрат, чем триангуляция или трилатерация. Для достижения наибольшего эффекта угловых и линейных измерений целесообразно, чтобы $m_N/\rho = m_s/s$, где m_s — средняя квадратическая ошибка измерения направления; $\rho = 206\,265''$; m_s/s — относительная средняя квадратическая ошибка измерения длин сторон, причем m_N и m_s должны определяться по невязкам — свободным членам условных уравнений.

Комбинированные геодезические сети создают на местности с сильно различающимися условиями, когда по технико-экономическим показателям

целесообразно на одном участке создавать, например, триангуляцию, а на соседних — полигонометрию или трилатерацию.

Опорные сети из астрономических пунктов создают при топографических съемках масштаба 1:100 000 и мельче, пункты этой сети располагают на расстоянии 80–100 км. Для перехода к геодезическим широтам и долготам в астрономические координаты вводят поправки за уклонения отвесных линий, определяемые в первом приближении по данным гравиметрической съемки. Этот метод применялся в нашей стране более 40 лет назад при съемках масштаба 1:100 000 в горных районах северо-востока и Средней Азии, сейчас там построена высокоточная геодезическая сеть.

Динамическая триангуляция предложена в 1920 г. финским геодезистом Вяйсяля. Суть ее сводится к синхронному наблюдению подвижных высоких целей m_1, m_2,..., m_n (воздушный шар, самолет и т. п.) с известных *A*, *B* и определяемых *C*, *D* пунктов (рис. 1.4)

По координатам пунктов *A*, *B* и измеренным на этих пунктах горизонтальным углам методом прямой засечки определяют координаты точек m_1, m_2,..., m_n, по которым, используя горизонтальные углы, измеренные на пунктах *C* и *D*), методом обратной засечки определяют координаты этих пунктов. В 40-х годах этим методом были соединены через остров Крит европейские и африканские триангуляции и через пролив Скагеррак — датские и норвежские.

Спутниковые методы создания геодезических сетей состоят из геометрических и динамических. В геометрическом методе ИСЗ используют как высокую визирную цель, в динамическом — ИСЗ является носителем координат. В геометрическом методе спутники фотографируют на фоне опорных звезд, что позволяет определить направления со станции слежения на спутники. Фотографирование нескольких положений ИСЗ с двух и более исходных и нескольких определяемых пунктов позволяет получить координаты определяемых пунктов. Эту же задачу решают путем измерения расстояния до спутников. Создание навигационных систем (в России — Глонасс и в США — Navstar), состоящих не менее чем из 18 ИСЗ, позволяет в любой момент в любой части Земли определять геоцентрические координаты *X*, *Y*, *Z*, с более высокой точностью, чем используемая ранее американская навигационная система Transit, которая позволяет определять координаты *X*, *Y*, *Z*, с ошибкой 3–5 м.

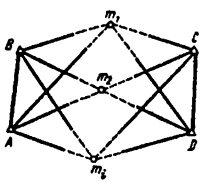


Рис. 1.4. Схема динамической триангуляции

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ). Состоит из радиотелескопов *A* и *B*

(рис. 1.5), установленных на расстоянии D — базы интерферометра. Радиотелескопы синхронно принимают в сантиметровом диапазоне излучения одного и того же квазара K — внегалактического радиоисточника. Обработка записанных радиосигналов позволяет определить временную задержку моментов τ прихода фронта радиоволны к радиотелескопу A относительно B, а также частоту интерференции f. Разность расстояний от радиотелескопов до квазара на момент наблюдения $\Delta s = \tau\upsilon$, где υ — скорость распространения радиоволн.

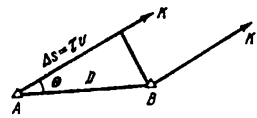


Рис. 1.5. Схема измерения методом длиннобазисной интерферометрии

В результате совместной обработки многочисленных значений τ и f находят: разности геоцентрических координат концов базы радиоинтерферометра, по которым определяют длину D и угол θ, координаты радиоисточника и полюса Земли; мгновенную скорость вращения Земли; элементы прецессии и нутации; истинное гринвичское время моментов определения τ и f и другие параметры.

Метод РСДБ позволяет определять базы длиной в несколько тысяч километров с ошибкой в 1–3 см, направление баз 0,001″, координаты полюса Земли — 3–5 см, координаты наблюдаемых квазаров — 0,001″. С такой же точностью определяют вариации суточного вращения Земли, параметры прецессии и нутации.

Для метода РСДБ необходимы радиотелескопы с антеннами диаметром 20–60 м, принимающие излучение в сантиметровом диапазоне, атомные генераторы частоты со стабильностью 10^{-13}–10^{-14}, видеомагнитофоны для записи информации объемом порядка 10^9 единиц, каталоги квазаров с угловыми размерами не более 0,001″, машинное и математическое обеспечение. При уменьшении длины баз до нескольких сот километров возможно использование передвижных радиотелескопов с антеннами 3,3–5,0 м, работаюших в паре с большими 60-метровыми радиотелескопами.

1.1.4. Государственная геодезическая сеть. Программа Ф. Н. Красовского. Основные положения 1954–1961 гг.

Ф.Н. Красовский разработал фундаментальную программу построения государственной триангуляции в СССР, которая была опубликована в 1928 г. В 1939 г. она нашла отражение в Основных положениях о построении опорной геодезической сети СССР. Согласно этой программе государственная триангуляция создавалась по принципу перехода от общего к частному (рис. 1.6),

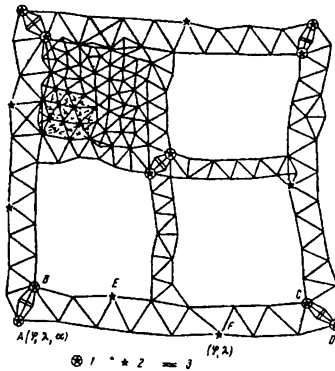


Рис. 1.6. Схема Ф.Н. Красовского государственной триангуляции:
1 — пункт Лапласа; 2 — промежуточный астропункт; 3 — базис

состояла из рядов триангуляции (астрономо-геодезической сети) 1-го класса длиной 200–250 км, прокладываемых примерно вдоль параллелей и меридианов; основных рядов триангуляции 2-го класса длиной 100–120 км; заполняющей сети 2-го класса, сети 3-го класса и определяемых засечками пунктов 4-го класса.

На пересечениях рядов 1-го класса определяли длину и азимут *выходных сторон* триангуляции. Длины выходных сторон находили путем построения базисных сетей, в которых измеряли все углы и базис (проволоками) длиной 6–8 км; углы против базиса должны быть не менее 36°. Базисы измеряли с относительной средней квадратической ошибкой не более 1:500 000, а длины сторон определяли с ошибкой не более 1:300 000.

На концах выходных сторон — пунктах Лапласа 1 — определяли астрономические широты φ, долготы λ и азимуты α. В каждом звене триангуляции 1-го класса (звеном называют часть триангуляции 1-го класса между соседними выходными сторонами) кроме пунктов Лапласа через 70–100 км устанавливали промежуточные астрономические пункты 2, на которых измеряли φ и λ.

В 1932 г. начали выполнять общую гравиметрическую съемку территории СССР. Гравиметрические измерения по специальной программе стали выполнять при создании астрономо-геодезической сети. Совместное использование геодезических, астрономических и гравиметрических измерений позволяет вычислить астрономо-геодезические уклонения отвесных линий, детально изучить форму Земли и математически строго редуцировать результаты геодезических измерений с поверхности Земли на поверхность референц-эллипсоида.

Каждый полигон 1-го класса делился на четыре части основными рядами 2-го класса (см. рис. 1.6), в пересечении рядов строилась базисная 3 сеть для определения выходной стороны, на концах которой размещали пункты Лапласа для определения φ, λ, α.

Топографические съемки в масштабах 1:5000, 1: 2000 для удовлетворения потребностей различных отраслей народного хозяйства СССР привели в конце 40-х гг. к необходимости увеличить плотность и точность государственных геодезических сетей. Проект новой программы был опубликован для обсуждения в 1948 г. В 1954 г. были утверждены «Основные положения о государственной геодезической сети СССР» (сокращенно — Положения 1954 г.). В 1961 г. в Положения 1954 г. внесены изменения и дополнения в связи с применением высокоточных свето- и радиодальномеров. Действующая в настоящее время программа изложена в Основных положениях 1954–1961 гг., на ее основе в 1966 г. издана Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР.

Общим в новой и старой программах является соблюдение принципа перехода от общего к частному. Государственная геодезическая сеть (ГГС) России является главной геодезической основой топографических съемок всех масштабов, должна удовлетворять требованиям народного хозяйства и обороны страны при решении соответствующих научных и инженерно-технических задач. ГГС создается методами триангуляции, полигонометрии, трилатерации и их сочетаниями, позволяющими при прочих равных условиях обеспечивать требуемую точность и наибольшую экономическую эффективность.

ГГС подразделяют на сети 1, 2, 3 и 4-го классов. Астрономо-геодезическая сеть (АГС) 1 класса создается полигонами длиной около 800 км, длина звена 200 км, используется для научных исследований по изучению формы и размеров Земли, ее внешнего гравитационного поля и для распространения единой системы координат на всю территорию страны. Геодезические сети 2-го класса являются основой для создания сетей 3-го и 4-го классов.

Астрономо-геодезическая сеть. Схема построения *АГС* по Основным положениям 1954–1961 гг. приведена на рисунке 1.7. В таблице 1 приведены

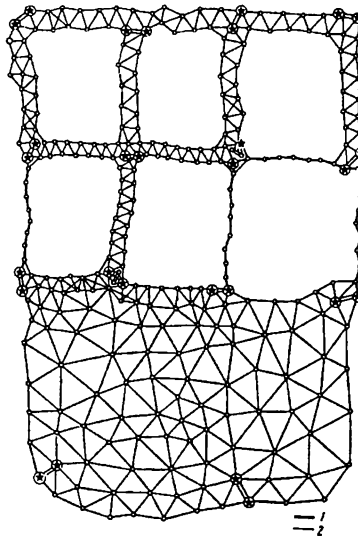


Рис. 1.7. Схема построения астрономо-геодезической сети по Основным положениям 1954–1961 гг.:
1 — сторона полигонометрии 1-го класса;
2 — сторона триангуляции 1-го класса

основные характеристики ГГС, построенных по Основным положениям 1939 г. и по Основным положениям 1954–1961 гг. Типовой фигурой звеньев триангуляции 1-го класса является треугольник, близкий равностороннему, могут также использоваться комбинации треугольников, геодезических четырехугольников и центральных систем. В отдельных районах, где это целесообразно, могут строиться сплошные сети триангуляции 1-го класса и звенья полигонометрии 1-го класса, которые должны быть вытянутыми (максимальное удаление пунк-

Таблица 1

Показатель	Основные положения 1939 г.					Основные положения 1954–1961 гг.			
	Класс					Класс			
	1	2 (основные ряды)	2 (заполняющая сеть)	3	4	1	2	3	4
Длина звена триангуляции, км	200–250	100–120	–	–	–	200	–	–	–
Средняя длина стороны треугольника, км	25–30	15–20	13	8	Засечка	20–25	7–20	5–8/3–8*	2–5
Обратный вес звена триангуляции, единица 6-го знака логарифма, не более	120	–	–	–	–	100	–	–	–
Относительная ошибка базисной выходной стороны	1:300 000	1:200 000	1:200 000	–	–	1:400 000	1:300 000	1:200 000	1:200 000
Примерная относительная ошибка стороны в слабом месте	1:100 000	1:60 000	1:35 000	1:15000		1:150 000	1:200 000	1:20 000	1:70 000
Относительная ошибка измерения стороны в полигонометрии	–	–	–	–	–	1:300 000	1:250 000	1:200 000	1:150 000

* В знаменателе приведены значения для полигонометрии, оценка точности измерения угла выполнена по внутренней сходимости.

Окончание табл. 1

Показатель	Основные положения 1939 г.					Основные положения 1954–1961 гг.			
	Класс					Класс			
	1	2 (основные ряды)	2 (заполняющая сеть)	3	4	1	2	3	4
Наименьшее значение угла треугольника, градус	40	30	20	15	20	40	20	20	20
Допустимая невязка треугольника, угл. с	3	5	9	15	35	3	4	6	6
Средняя квадратичная ошибка угла по невязкам треугольника, угл. с	0,7–0,9	1,2–1,5	2,0–2,5	4–5	–	$\frac{0,7}{0,4^*}$	1	1,5	2,0
Средняя квадратичная ошибка астроопределений									
широты, угл. с	0,2–0,4	0,4	–	–	–	0,3	0,3	–	–
долготы	0,03	0,05	–	–	–	0,03	0,03	–	–
азимута, угл. с	0,5	1,0	–	–	–	0,5	0,5	–	–
Средняя квадратичная ошибка взаимного положения смежных пунктов, м	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	0,15	0,06	0,06	0,06

тов от замыкающей — не более 20 км, углы между отдельными сторонами и замыкающей — не более 20°), содержать не более 10 сторон длиной 20–25 км и иметь через 10 сторон базисные стороны и пункты Лапласа.

На пересечении рядов светодальномерами измеряют базисные стороны с относительной ошибкой не более 1:400 000. Оба конца базисных сторон являются пунктами Лапласа, на которых определяют φ, λ, α. Используя уравнение Лапласа, определяют геодезические азимуты A, которые позволяют ориентировать АГС, контролировать результаты геодезических измерений путем определения свободного члена азимутального условного уравнения и сравнения его с допустимым значением и в итоге — повышают точность АГС. По всем рядам выполняют астрономо-гравиметрическое нивелирование. Кроме того, выделяют основные ряды 1-го класса, на которых астрономические пункты располагают более часто — через 40–50 км — и вокруг них выполняют особое гравиметрическое сгущение.

Координаты АГС России вычисляют в единой системе координат 1942 г. с исходным пунктом в центре круглого зала Пулковской обсерватории.

Геодезические сети 2-го класса в основном являются сплошной сетью треугольников, заполняющих полигоны АГС 1-го класса. Базисные стороны размещают равномерно не более чем через 25 треугольников, одна из базисных сторон должна быть примерно в середине полигона 1-го класса, на концах этой стороны определяют пункты Лапласа. При экономической целесообразности сети 2-го класса могут создаваться полигонометрическими ходами, образующими сплошную сеть замкнутых полигонов с равномерным расположением пунктов внутри полигона 1-го класса. Возможно комбинирование триангуляции и полигонометрии.

Схемы сетей полигонометрии и комбинированных сетей триангуляции и полигонометрии разрабатываются отдельно для каждого района с учетом географии, залесенности, рельефа местности и т. п. Горизонтальные углы и длины сторон в полигонометрии 2-го класса необходимо измерять со средней квадратической ошибкой не более 1″ (по невязкам замкнутых полигонов) и 1:250 000 соответственно. Метод трилатерации для создания сетей 1 и 2-го классов не применяется.

Согласно исследованиям К.Л. Проворова точность передачи азимута и длины стороны в более геометрически жесткой сплошной сети из равносторонних треугольников повышается примерно в три раза по сравнению с триангуляционным рядом. Поэтому АГС 1-го класса менее точна, чем опирающиеся на нее сплошные сети 2-го класса: примерная относительная ошибка стороны в слабом месте в АГС 1-го класса равна 1:150 000, а в сетях 2-го

класса — 1:200 000; средняя квадратическая ошибка взаимного положения смежных пунктов равна 0,15 м — в АГС 1-го класса и 0,06 м — в сетях 2–4-го классов (см. табл. 1).

Уравнивание сетей 2-го класса внутри полигонов 1-го класса, принимаемых за исходные, приводит к деформации сетей 2-го класса. Наиболее заметно искажаются углы на пунктах 2-го класса вблизи АГС 1 класса (поправки в углы, получаемые из уравнивания, достигают 5–7″, т. е. значительно превышают ошибки угловых измерений). Искажение углов и деформация сети по мере удаления от пунктов 1-го класса быстро уменьшаются.

Геодезические сети 3 и 4-го классов. Сети 3 и 4-го классов сгущают до требуемой плотности сети 2-го класса, они могут создаваться методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации. Выбирают тот метод, который при обеспечении требуемой точности дает наибольшую экономическую эффективность. Характеристика этих сетей приведена в таблице 1. При использовании метода полигонометрии между узловыми и исходными пунктами допускается не более двух точек поворота.

При расстоянии между ходами менее 4 км в сети 3-го класса и менее 3 км в сети 4-го класса их необходимо связывать между собой, т. е. прокладывать между ними ход.

На всех пунктах ГГС 1-4-го классов устанавливают два *ориентирных пункта* (ОРП) с подземными центрами, расстояния до ОРП 0,5–1,0 км (в лесу не менее 250 м). ОРП должны быть видны в теодолит, установленный на штативе над центром знака. За один из ориентирных пунктов можно принимать хорошо видимый с земли геодезический пункт или местный предмет (крест колокольни, шпиль башни и т. п.) при его расстоянии до данного пункта сети не более 3 км. ОРП необходимы для азимутальной привязки последующих геодезических построений (полигонометрии 1 и 2-го разрядов, теодолитных ходов и т. п.).

Высоты всех пунктов ГГС определяют методами геометрического (в равнинных и всхолмленных районах) и тригонометрического нивелирования. В среднем точность измерения углов построенной ГГС оказалась выше, установленной Основными положениями 1954–1961 гг.: 0,65″; 0,75″; 1,1″; 1,5″ в сетях 1, 2, 3, 4-го классов соответственно. Средняя квадратическая ошибка определения азимутов Лапласа, полученная в результате уравнивания блоков АГС, равна 1,1″, т. е. примерно в два раза больше предусмотренной Основными положениями 1954–1961 гг.

В целом ГГС России по точности обеспечивает картографирование страны во всех масштабах вплоть до 1:2000 и позволяет решать научные и инженерно-технические задачи народного хозяйства страны. Дальнейшее совершенствование АГС может быть сведено к следующему. Совместное уравнивание

сети 1 и 2-го классов с использованием всех измеренных направлений, азимутов на пунктах Лапласа, базисных или выходных сторон с учетом их весов и определением поправок в непосредственно измеренные величины, при этом будут устранены значительные деформации сети 2-го класса вблизи АГС 1-го класса и повышена точность определения координат всех пунктов. На следующем этапе предусмотрено построение фундаментальной геодезической сети (ФГС) с длинами сторон 2000–3000 км с сантиметровой и более высокой точностью измерения этих сторон. Каждый пункт ФГС должен стать обсерваторией или стационарной фундаментальной геодезической станцией, на которой периодически по определенной программе должен выполняться комплекс точнейших измерений: спутниковые — для определения геоцентрических координат; астрономические — для нахождения широт, долгот, азимутов; гравиметрические — для получения ускорения силы тяжести и т. п. Высоты всех пунктов ФГС целесообразно определить из нивелирования 1-го класса. Совместная обработка перечисленных и, возможно, других измерений позволит определить с высокой точностью координаты пунктов ФГС на данный момент времени и использовать их в качестве исходных при построении системы опорных пунктов на территории страны и, кроме того, для высокоточного определения координат ИСЗ, что в свою очередь позволит повысить точность автономного определения координат точек земной поверхности из наблюдений ИСЗ.

1.1.5. Программа автономных методов спутниковых координатных определений

Разработанные Федеральной службой геодезии и картографии России концепция и программа перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений изложены в работе Е. А. Жалковского, Г. В. Демьянова, В. И. Зубинского, П. Л. Макаренко, Г. А. Пьянкова «О концепции и программе перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений» (Геодезия и картография, 1998, № 5). Традиционные геодезические методы основаны на последовательном развитии геодезических сетей путем угловых и линейных измерений, требующих для обеспечения прямой видимости между смежными пунктами постройки геодезических знаков, сооружение которых потребовало около 80% средств, затраченных на создание существующих опорных сетей.

Государственная геодезическая сеть (ГГС), создававшаяся в течение многих десятилетий как единая система для территории СССР, имеет около 164 тысяч

закрепленных на местности пунктов 1 и 2-го классов астрономо-геодезической сети (АГС).

Распространение единой системы высот па всю территорию стран СНГ осуществляется путем создания государственной нивелирной сети (ГНС), т. е. нивелирных сетей 1 и 2-го классов (главная высотная основа) и заполняющих сетей 3 и 4-го классов.

В систему государственного геодезического обеспечения входит также государственная фундаментальная гравиметрическая сеть (ГФГС), государственная гравиметрическая сеть 1-го класса и сеть астрономо-гравиметрического нивелирования (АГН).

Обеспечивая многие практические потребности, существующие наземные геодезические методы по точности, оперативности, экономической эффективности не соответствуют некоторым важным современным требованиям науки и практики, например, при изучении геодинамических процессов.

По сравнению с традиционными спутниковые методы ГЛОНАСС/СР5 имеют следующие преимущества:

- передача с высокой оперативностью и точностью координат практически на любые расстояния;
- геодезические пункты можно располагать в благоприятных для их сохранности местах, так как не нужно обеспечивать взаимную видимость между пунктами и, следовательно, строить дорогостоящие геодезические знаки;
- простота и высокий уровень автоматизации работ;
- понижение требований к плотности исходной геодезической основы.

Реализация спутниковых технологий предусматривает построение следующих геодезических сетей:

1) фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) — высшее звено координатного обеспечения; она должна обеспечивать оперативное воспроизведение общеземной геоцентрической системы координат, стабильность системы координат во времени, метрологическое обеспечение высокоточных космических средств измерений;
2) высокоточная геодезическая сеть (ВГС), обеспечивающая распространение на всю территорию страны общеземной геоцентрической системы координат и определение точных параметров взаимного ориентирования общеземной и референцной систем координат;
3) спутниковые геодезические сети 1-го класса (СГС-1).

Эти три класса сетей строго связаны между собой: ФАГС является опорой для ВГС, а ВГС — для СГС-1.

При построении ФАГС, ВГС и СГС-1 предусматривается привязка существующей ГГС к высшему классу спутниковых сетей, т. е. существующая ГГС будет сетью сгущения.

Пункты ФАГС располагаются на расстоянии 800–1000 км, их число — 50+70, 10–15 пунктов должны быть постоянно действующими, а остальные — переопределяться группами через промежутки времени, зависящие от геодинамической активности региона.

Пространственное положение пунктов ФАГС определяется в общеземной системе координат с ошибкой положения пунктов относительно центра масс не более $(2–3)10^{-8}$ R, где R — радиус Земли, ошибка взаимного положения пунктов ФАГС не более 2 см в плане и 3 см по высоте. Для обеспечения этой точности необходимо использовать весь комплекс существующих космических измерений (лазерных, радиоинтерферометрических и других).

ВГС является системой пунктов с расстоянием D = 150–300 км между ними, которые определяются относительными методами космической геодезии со средней квадратической ошибкой не более 3 мм + $5 \cdot 10^{-8}$ D для плановых координат и 5 мм + $7 \cdot 10^{-8}$ D — для геодезических высот.

СГС-1 состоят из системы легкодоступных пунктов с плотностью, достаточной для использования потребителями всевозможных спутниковых определений. СГС-1 определяются относительными методами космической геодезии со средними квадратическими ошибками: 3 мм + 10^{-7} D в плане и 5 мм + $2 \cdot 10^{-8}$ D по геодезической высоте для геодинамически активных регионов и 5 мм + $2 \cdot 10^{-7}$ D в плане и 7мм + $3 \cdot 10^{-7}$ D по высоте для остальных регионов. Среднее расстояние между пунктами СГС-1 равно 25–35 км. В экономически развитых районах пункты СГС-1 в зависимости от требований потребителей могут иметь большую плотность.

Постоянно действующие пункты ФАГС в основном создаются на базе действующих пунктов спутниковых (космических) наблюдений, астрономических обсерваторий, пунктов службы вращения Земли, радиоинтерферометрических комплексов со сверхдальними базами «Квазар», программы «Дельта» и др. На пунктах ФАГС предусматривают две программы наблюдений: постоянные наблюдения спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (включая и международные программы) и наблюдения других специализированных спутников и космических объектов согласно межведомственным программам построения ФАГС. На пунктах ФАГС должны выполняться абсолютные гравиметрические определения.

Выполнение планируемых Концепцией мероприятий позволит:

1) повысить точность и оперативность геодезических определений на один-два порядка;

2) повысить уровень автоматизации работ в топографогеодезическом производстве;
3) внедрить новые точные и оперативные методы геодезического обеспечения аэрофототопографических и других съемок, спутниковых методов точного нивелирования;
4) автоматизировать работы по установлению границ земельных участков;
5) исключить строительство наружных геодезических знаков;
6) разместить геодезические пункты в удобных для потребителя местах;
7) внедрить методы спутникового нивелирования вместо геометрического нивелирования 3 и 4-го классов;
8) обеспечить изучение деформаций земной коры, являющихся предвестниками землетрясений и других опасных природных явлений;
9) создать систему постоянных наблюдений за динамикой уровней морей на уровенных постах и прогноза их состояния;
10) обеспечить геодезическое обоснование картографирования страны и создание геоинформационных систем;
11) установить на территории СНГ высокоточную единую геодезическую систему координат и поддерживать ее на уровне современных и перспективных требований экономики, науки и обороны страны.

Следует заметить, что спутниковые технологии не всегда можно использовать при решении традиционных геодезических задач, например, недостаточна относительная точность определений на коротких расстояниях, ограничено использование GPS-методов в точной инженерной геодезии, процесс привязки ориентирных пунктов, легко решаемый в традиционной технологии, становится довольно сложным и дорогим, особенно в закрытой местности, в спутниковой технологии, так как объем спутниковых определений в этом случае возрастает более чем в два раза (Жданов Н. Д., Макаренко Н. Л. О концепции перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений. — Геодезия и картография, 1998, № 3).

Сложно, а иногда и невозможно использовать GPS в закрытой и полузакрытой местности из-за экранирования спутниковых сигналов, что приводит к необходимости дополнительной привязки объектов обычными методами. Кроме отмеченных имеются и другие недостатки GPS-методов, которые приводят к необходимости наряду со спутниковыми использовать и традиционные технологии выполнения геодезических работ.

1.1.6. Государственная нивелирная сеть. Классификация и основные характеристики нивелирных сетей

Государственная нивелирная сеть строится по принципу от общего к частному, делится на I, II, III и IV классы, является главной высотной основой топографических съемок всех масштабов и геодезических работ, выполняемых для удовлетворения потребностей народного хозяйства, науки и обороны страны.

Нивелирные сети I и II классов создают единую систему высот на территории страны, их используют для решения научных задач: изучения вертикальных движений земной поверхности и исследования физической поверхности Земли, определения разности высот поверхностей морей и океанов и т. п.

Нивелирные сети III и IV классов создают для выполнения топографических съемок и решения инженерно-геодезических задач. Особо следует отметить высокоточные нивелирные сети на геодинамических и техногенных полигонах, создаваемых для изучения современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений и т. п.

Средние квадратические ошибки нивелирования определяют по формулам

$$\eta^2 = \frac{1}{4n}\sum\frac{d^2}{r}; \quad \delta^2 = \frac{1}{4\Sigma L}\sum\frac{s^2}{L},$$

где $d = h_{пр.} - h_{обр.}$, где $h_{пр.}$ и $h_{обр.}$ — превышения по секциям в прямом и обратном ходах, мм; r — длина секции, км; s — накопление разностей $\sum d$ на участке (линии), мм; L — длина участка (линии), км, $L \geq 100$ км. Характеристики точности и размеры полигонов приведены в таблице 2.

Периметры нивелирных полигонов I класса в городах зависят от очертания городской территории.

Через 25 лет, а в сейсмоактивных районах через 15 лет, нивелируют повторно все линии I класса и через 35 и 25 соответственно — II класса.

На линиях I, II, III и IV классов закладывают вековые, фундаментальные, грунтовые, скальные, стенные и временные реперы.

Вековые реперы обеспечивают продолжительную сохранность главной высотной основы, позволяют изучать вертикальные движения земной коры и колебания уровней морей и океанов, ими закрепляют места пересечений линий нивелирования I класса. Фундаментальные реперы закладывают на линиях нивелирования I и II классов не реже чем через 60 км (в сейсмоактивных районах — через 40 км), на узловых точках, вблизи морских, речных и озерных

Таблица 2

Характеристика	Класс нивелирования			
	I	II	III	IV
Предельная средняя квадратическая ошибка: случайная η, мм/км Систематическая σ, мм/км	0,8 0,08	2,0 0,20	5,0 –	10,0 –
Допустимая невязка f, мм, в полигонах и по линиям, L – в км	$3\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	$10\sqrt{L}$	$20\sqrt{L}$
Периметры нивелирных полигонов, км				
1) обжитые районы	1200	400	60–150	20–60
2) малообжитые районы	2000	1000	100–300	25–80
3) локальные и площадные геодинамические полигоны	40	20	–	–
4) застроенная территория города		50	25	8
5) незастроенная территория города		80	40	12

уровенных постах. В 50–150 м от фундаментального репера закладывают репер-спутник.

Грунтовые, скальные и стенные реперы используют для закрепления нивелирных сетей I, II, III и IV классов. Временные реперы (сохраняются несколько лет) служат высотной основой для топографических съемок, их включают в ходовые линии нивелирования I, И, III и IV классов.

Местоположение реперов опознают на топокартах масштаба 100 000–1:25 000 и крупнее и на аэроснимках, их прилагают к материалам нивелирования, по карте определяют геодезические координаты репера (с ошибкой 0,25′). Координаты фундаментальных реперов определяют геодезическими методами с ошибкой не более 1 м.

Для перехода к системе нормальных высот измеренные превышения между реперами I и II классов, а также нивелирования III класса в горах исправляют поправками

$$\delta_h = \frac{1}{\gamma_m}(\gamma_A - \gamma_B)H_m + \frac{h}{\gamma_m}(g-\gamma)_m.$$

где γ_m — приближенное значение нормального ускорения силы тяжести, на территории СНГ γ_m = 9,8 м/с^2; γ_A, γ_B — нормальные ускорения силы тяжести на

отсчетом эллипсоиде на реперах A и B; $(g-\gamma)_m$, H_m — среднее из аномальной силы тяжести и абсолютных высот на реперах A и B; h — измеренное превышение между реперами A и B.

Нивелирные сети в городах, населенных пунктах и на промышленных площадках должны обеспечивать все потребности городского хозяйства и строительства, превышения между наиболее удаленными реперами нивелирной сети города должны быть известны с ошибкой не более 30 мм.

1.1.7. Нивелирование I класса

Схема построения. Нивелирная сеть I класса состоит из замкнутых полигонов периметром 1200–2000 км, ходы прокладывают по железным, шоссейным и грунтовым дорогам, в труднодоступных районах — по берегам рек, тропам, зимникам; должны быть связаны с основными морскими и речными водомерными установками, нивелирные ходы I класса прокладывают в прямом и обратном направлениях одновременно по двум парам костылей, образующих правую и левую линии нивелирования, прямой и обратный ходы прокладывают по одной и той же трассе участками, состоящими из нескольких смежных секций общей длиной 25–30 км, как правило, в разные половины дня и по возможности с четным числом станций в каждой секции.

Наблюдения выполняют только при благоприятных условиях видимости, при отчетливых и спокойных изображениях штрихов реек.

Приборы. Для нивелирования I класса используют штриховые рейки с инварной полосой и высокоточные нивелиры, имеющие зрительную трубу с увеличением не менее 40^x, контактный цилиндрический уровень с ценой деления не менее 12″ на 2 мм или компенсатор с ошибкой самоустановки линии визирования не более 0,2″, оптический микрометр с ценой деления 0,05 мм. Из современных высокоточных нивелиров наиболее пригодны нивелиры типа H-05, Ni002, Ni 004.

Методика нивелирования. Нивелирование I класса выполняют методом совмещений с наивысшей точностью и с возможно полным исключением систематических ошибок. Длина визирного луча — до 50 м, неравенство расстояний от нивелира до реек на станции — не более 0,5 м, накопление в секции — до 1 м, высота визирного луча над почвой — не менее 0,8 м: при длине визирного луча 25 м и меньше высота визирного луча может быть уменьшена до 0,5 м. Последовательность наблюдений на станции в прямом ходе (правая и левая линии) на нечетной станции по схеме: $З_0$–$П_0$–$П_Д$–$З_Д$; на четной станции — $П_0$–$З_0$–$З_Д$–$П_Д$; в обратном ходе на нечетных станциях — $П_0$–$З_0$–$З_Д$–$П_Д$; на четных — $З_0$–$П_0$–$П_Д$–$З_Д$.

Контроль и допуски. На каждой станции вычисляют:

1) превышения h_0 по основной и h_g по дополнительной шкалам реек правой и левой линии; разности $\Delta = (h_g - h_0) \le 0{,}5$ мм;

2) расхождение между превышением задней пары костылей данной станции и превышением передней пары костылей предыдущей станции не должно превышать 0,7 мм;

3) по каждой секции (между смежными реперами в ходе) и участку (между фундаментальными реперами в ходе) вычисляют попарно суммы превышений $[h_Л]_{пр.}$ по правой стороне и $[h_Л]_{пр.}$ по левой линиям прямого, $[h_Л]_{обр.}$ и $[h_Л]_{обр.}$ обратного ходов, расхождения превышений правой и левой линий не более $(2\sqrt{L})$ мм при числе n станций на 1 км до 15 и $(3\sqrt{L})$ мм при $n > 15$, а также $[h_{ср.}]_{пр.} = ([h_Л]+[h_Л])_{пр.}/2$ и $[h_{ср.}]_{обр.} = ([h_Л]+[h_Л])_{обр.}/2$, расхождения между средними превышениями прямого и обратного ходов не должны превышать 3 мм $\sqrt{L}$ (L — длина хода в км) при $n \le 15$ и 4 мм $\sqrt{L}$ — при $n > 15$.

1.1.8. Нивелирование II класса

Схема построения. Ходы нивелирования II класса опираются на реперы нивелирования I класса, образуют полигоны с периметром 400–1000 км. В районах, не имеющих ходов нивелирования I класса, нивелирную сеть II класса строят самостоятельно с таким же периметром. Ходы нивелирования II класса прокладывают по улучшенным путям сообщений, а при их отсутствии — по берегам морей, больших рек, по тропам и зимникам, их связывают с морскими и речными водомерными установками.

Нивелирные ходы II класса прокладывают по одной паре костылей в прямом и обратном направлениях смежными секциями, как и при нивелировании I класса.

Приборы. Применяют штриховые рейки с инварной полосой и высокоточные нивелиры с теми же требованиями, что и для I класса. Из современных высокоточных уровенных нивелиров наиболее пригодны Н-05, Н1, Н2, НА, Ni004 и нивелиры с компенсаторами НС-2, Ni1, Ni002, Ni007.

Методика нивелирования. Нивелирование II класса выполняют методом совмещения. Уравненное превышение в ходе длиной 1 км определяют со средней квадратической случайной ошибкой не более 0,8 мм, а превышение на станции — 0,3 мм. Нормальная длина визирного луча — 65 м, а при увеличении зрительной трубы не менее $44^{\times}$ — до 75 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек на станции — до 1 м, накопление в секции — не более 2 м. Высота визирного луча над почвой — не менее 0,5 м. При длине визирного

луча 50 м и менее высота визирного луча может быть уменьшена до 0,3 м. Последовательность наблюдений на станции в прямом и обратном ходах на нечетных и четных станциях такая же, как и при нивелировании I класса.

Контроль и допуск. На каждой станции $d = (h_g - h_0) \le 0{,}7$ мм, где h_0, h_g — превышения, вычисленные по отсчетам по основным и дополнительным шкалам. Для прямого и обратного ходов по каждой секции и по участку вычисляют $[h]_{пр}$ прямого и $[h]_{обр.}$ обратного ходов. Расхождение этих сумм не должно превышать $(5\sqrt{L})$, где L — длина хода в км, при среднем числе n станций на 1 км хода до 15 и $(6\sqrt{L})$ мм — при $n > 15$.

1.1.9. Нивелирование III класса

Схема построения. Ходы нивелирования III класса прокладывают внутри полигонов нивелирования I и II классов так, чтобы разделить каждый полигон II класса на 6–9 полигонов периметром менее 150 км в обжитых и 300 км в малообжитых районах. Нивелирные ходы III класса прокладывают по одной паре костылей в прямом и обратном направлениях и желательно с четным числом n станций в каждой секции, метод нивелирования зависит от применяемых нивелиров и реек. При использовании нивелиров с оптическим микрометром и штриховых реек применяют метод совмещений, при использовании других нивелиров отсчеты по рейкам делают по средней нити. Рейки устанавливают по уровню.

Приборы. Используют точные уровенные нивелиры Н-3, Н-3Л и равноценные им и нивелиры с компенсаторами Н-3К, Н-3КЛ, Ni007, Ni-B3. Применяют двусторонние трехметровые шашечные рейки с сантиметровыми делениями или штриховые односторонние с инварной полосой или без нее с делениями через 0,5 см.

Методика наблюдений. Уравненное превышение в ходе длиной 1 км определяют со средней квадратической случайной ошибкой не более 1,6 мм, а превышения на станции — 0,65 мм. Нормальная длина визирного луча равна 75 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 35$^{\times}$ — до 100 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек — не более 2 м, а накопление в секции — 5 м. Высота визирного луча над почвой — не менее 0,3 м. Наблюдения на станции в прямом и обратном ходах выполняют по схеме: $З_ч$–$П_ч$–$П_к$–$З_к$ для штриховых реек и $З_ч$–$П_ч$–$П_к$–$З_к$ — для шашечных реек (индексы «ч» и «к» означают черную и красную стороны реек).

Контроль и допуски. На каждой станции вычисляют $d = h_з$ — h_0 (или $d = h_к - h_ч$) и разность высот реек, которые не должны превышать 1,5 мм при

наблюдении способом совмещений и 3 мм — при отсчетах по шашечным рейкам. Вычисляют $[h]_{пр.}$ прямого и $[h]_{обр.}$ обратного ходов, разность сумм превышений в прямом и обратном ходах не должна быть более $(10\sqrt{L})$ мм.

1.1.10. Нивелирование IV класса

Схема построения. Ходы нивелирования IV класса прокладывают в одном направлении внутри полигонов нивелирования старших классов с опорой на реперы I–III классов или на узловые реперы IV класса.

Приборы. Используют нивелиры с уровнем Н3, НВ, Ni-030 и нивелиры с компенсаторами Н-3К, НС3, НС4, 5, 6. По указанию ФСГиК РФ можно использовать и другие типы нивелиров. Рейки применяют двусторонние трехметровые шашечные, с сантиметровыми делениями, их устанавливают по уровню.

Методика нивелирования. Нормальная длина визирного луча равна 100 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 30$^{\times}$ — до 150 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек на станции — 5 м, а их накопление в секции — 10 м. Высота визирного луча над почвой — не менее 0,2 м. Наблюдения на станции выполняют по схеме: $З_Ч$–$П_Ч$–$П_К$–$З_К$.

Контроль и допуски. На каждой станции $d = (h_К - h_Ч) \le 5$ мм. Невязки f_h ходов, опирающихся на реперы старших классов, не должны превышать $(20\sqrt{L})$.

1.1.11. Техническое нивелирование

Схема построения. Ходы технического нивелирования прокладывают отдельными линиями между реперами старших классов государственной нивелирной сети замкнутыми полигонами и системами с узловыми точками. На отдельных площадках, не обеспеченных реперами старших классов, допускают самостоятельную сеть технического нивелирования в виде замкнутых полигонов. Нивелирные ходы прокладывают в одном направлении.

Приборы. Используют те же, что и при нивелировании IV класса.

Методика нивелирования. Программа наблюдений на станции такая же, что и при нивелировании IV класса. Если используют односторонние рейки, то наблюдения на станции выполняют при двух горизонтах прибора. Нормальная длина визирного луча 150 м, а при увеличении зрительной трубы — не менее 25$^{\times}$ — до 200 м. Наблюдения на станции выполняют так же, как и при нивелировании IV класса.

Контроль и допуски. На каждой станции $d = (h_К - h_Ч) \le 10$ мм.

Невязки f_h ходов, опирающихся на реперы старших классов, и невязки полигонов $W_{ПГ} = [h_{СР}] = ([h_Ч] + [h_К])/2$ не должны превышать $(50\sqrt{L})$.

Глава 1.2. СГУЩЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

1.2.1. Классификация и характеристика геодезической сети сгущения

В настоящее время наиболее эффективным методом создания геодезической сети, включая и геодезические сети сгущения, является метод, связанный со спутниковыми технологиями (ГЛОНАСС, GPS). Однако этот метод требует наличия приемной аппаратуры, высокая стоимость которой препятствует широкому ее использованию. Поэтому наряду с высокоэффективными спутниковыми технологиями используют и традиционные методы. Следует заметить, что при выполнении геодезических работ в закрытых помещениях и в стесненных условиях, когда наблюдение созвездия спутников невозможно или затруднительно, традиционные методы являются единственно возможными для решения многих задач. Остановимся на традиционных методах сгущения геодезической сети подробнее.

Геодезические сети сгущения строят методами триангуляции и полигонометрии для сгущения государственной геодезической сети до плотности, необходимой для создания съемочного обоснования съемок крупного масштаба. Триангуляцию 1 и 2-го разрядов развивают в открытой и горной местности. Там, где триангуляцию 1 и 2-го разрядов выполнить по условиям местности невозможно или нецелесообразно, развивают полигонометрическую сеть 4-го класса, 1 и 2-го разрядов. Необходимо отметить, что полигонометрия 4-го класса для крупномасштабных съемок по сравнению с государственной выполняется с пониженной точностью.

Характеристика триангуляции 1 и 2-го разряда и полигонометрии 4-го класса, 1 и 2-го разрядов приведена в таблице 3.

При создании полигонометрии выполняют весь комплекс основных геодезических работ: угловые и линейные измерения, нивелирование. Углы на пунктах полигонометрии измеряют способом отдельного угла или круговых приемов оптическими теодолитами типа. Т1, Т2, Т5 с точностью центрирования 1 мм. Высоты на все пункты полигонометрии передаются нивелированием IV класса или техническим. Линии измеряют непосредственно: светодальномерами, подвесными мерными приборами или косвенно — длины сторон хода вычисляют по вспомогательным величинам.

1.2.2. Триангуляция 1 и 2-го разрядов

Исходными пунктами для развития триангуляции 1-го разряда служат пункты государственной геодезической сети 1–4-го классов, а триангуляции 2-го разряда — пункты государственной геодезической сети и пункты триангуляции и полигонометрии 1-го разряда.

Каждый пункт триангуляции 1 и 2-го разряда определяют из треугольников, в которых измеряют все углы. Засечками не менее чем с трех измеренных направлений определяют только местные предметы, недоступные для наблюдения. Примерные схемы построения триангуляции 1 и 2-го разрядов приведены на рисунке 1.8.

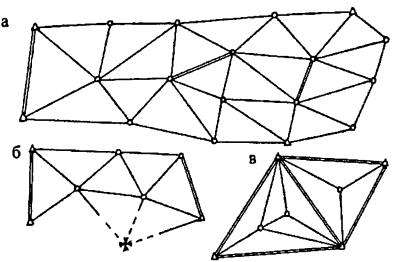


Рис. 1.8. Схемы триангуляции 1 и 2-го разрядов:
а — сплошная сеть триангуляции; *б* — цепочка треугольников и засечка; *в* — вставка

Сплошная сеть триангуляции должна опираться не менее чем на три исходных геодезических пункта и не менее чем на две исходные стороны. Триангуляция 1 и 2-го разрядов должна удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 3.

Углы в триангуляции 1 и 2-го разрядов измеряют способом круговых приемов и способом отдельного угла теодолитами Т1, Т2, Т5 и другими, им равноточными (табл. 4).

Если приемы не удовлетворяют установленным допускам, то их повторяют на тех же установках лимба. Теодолит, установленный на штативе, центрируют над центром пункта с точностью не ниже 2 мм, высотную привязку центров триангуляции 1 и 2-го разрядов выполняют нивелированием IV класса или техническим нивелированием.

Таблица 3

Характеристика	Триангуляция		Полигонометрия		
	1-й разр.	2-й разр.	4-й класс	1-й разр.	2-й разр.
Длина стороны (км)	5,0	3,0			
наибольшая			2,0	0,8	0.35
наименьшая			0,25	0,12	0,08
средняя расчетная			0,50	0,30	0,20
Минимальный угол (градус): в сплошной сети	20	20			
связующий в цепочке треугольников	30	30			
во вставке	30	20			
Число треугольников между исходными пунктами и сторонами, не более	10	10			
Минимальная длина исходной стороны, км	1	1			
Предельная длина хода (км): отдельного			15	5	3
между исходной и узловой точками			10	3	2
между узловыми точками			7	2	1,5
Предельный периметр полигона, км			30	15	9
Предельное число сторон в ходе, не более			15	15	15
Средняя квадратическая ошибка измерения утла (по невязкам в треугольниках, ходах, полигонах), не более	5″	10″	3″	5″	10″
Предельная допустимая невязка в треугольнике или в ходе, полигоне (n — число углов в ходе)	20″	40″	$5''\sqrt{n}$	$10''\sqrt{n}$	$20''\sqrt{n}$
Относительная ошибка исходной (базисной) стороны в ходе	1 :50 000	1:20 000	1 :25 000	1:10 000	1:5000
Относительная ошибка определения длины стороны в наиболее слабом месте, не более	1:20 000	1:10 000			

Таблица 4

Показатели	Теодолиты				
	Т1 и ему равнот.	Т2 и ему равноточные		Т5 и ему равноточные	
	4 кл	1 раз.	2 раз.	1 раз.	2 раз.
Число приемов:					
триангуляция		3	2	4	3
полигонометрия	4	2	2	3	2
Расхождение между результатами наблюдений на начальное направление в начале и конце полуприема: триангуляция, полигонометрия	6″	8″	8″	0,2′	0,2′
Колебания значений направлений, приведенных к общему нулю, в отдельных приемах и значении углов, полученных из разных приемов: триангуляция, полигонометрия	5″	8″	8″	0,2′	0,2′

1.2.3. Полигонометрия

Полигонометрией называют метод определения положения геодезических пунктов путем построения на местности полигонометрического хода (ломаной линии) или системы ходов (полигонометрическая сеть), в которых измеряют все углы и стороны. Полигонометрические ходы опираются на исходные, более высокого класса, пункты и линии. Они могут быть разомкнутыми и замкнутыми. Если ход по форме близок к прямой линии, то его называют вытянутым, в противном случае — изогнутым. Стремятся прокладывать вытянутые ходы с примерно одинаковыми сторонами, которые являются оптимальными по объему полевых работ, обработке и оценке точности.

В полигонометрической сети имеются узловые точки, в которых сходятся не менее трех ходов, замкнутые и разомкнутые полигоны. Отдельный ход между двумя узловыми или между узловой и исходной точками называют *звеном*. *Свободная сеть* полигонометрии опирается только на исходный пункт и дирекционный угол исходного направления. Если сеть имеет большое число исходных данных, то ее называют *несвободной*.

Если между пунктами двух параллельных ходов одного разряда меньше 0,5 км, то их соединяют перемычками того же разряда. Это необходимо для

повышения жесткости и однородности полигонометрической сети. Под однородностью сети понимают равенство ошибок взаимного положения ближайших пунктов во всех направлениях.

По методу создания полигонометрию разделяют на светодальномерную, траверсную (стороны измеряют подвесными мерными приборами), короткобазисную, створно-короткобазисную и параллактическую.

Для измерения углов в полигонометрии обычно применяют трехштативную систему с комплектом визирных марок, имеющих стандартные подставки, взаимозаменяемые с подставками теодолитов. При измерении углов на узловых точках необходимо 4–6 штативов. Точность центрирования теодолита и визирных целей должна быть 1 мм, эта точность обеспечивается оптическими центрирами, которыми снабжены современные теодолиты.

Более быстрое центрирование выполняют в такой последовательности: 1) устанавливают штатив с теодолитом на глаз над центром пункта, вдавливают ножки штатива в грунт; 2) подъемными винтами наводят перекрестие нитей оптического центрира на центр пункта; 3) только изменением длины ножек штатива приводят пузырек круглого или цилиндрического уровня в нуль-пункт; 4) точно горизонтируют теодолит подъемными винтами, несовмещение перекрестия сетки с центром пункта устраняют перемещением подставки прибора; 5) проверяют юстировку оптического центрира и точность центрировки поворотом прибора вокруг вертикальной оси на 180°.

На узловых точках углы измеряют методом круговых приемов, а на пунктах с двумя направлениями — способом измерения отдельного угла. Методика измерения углов такая же, как и в триангуляции. Количество приемов и некоторые характеристики угловых измерений приведены в таблице 4. Средние значения углов в полигонометрии 1 и 2-го разрядов округляют до целых секунд.

После завершения полевых работ проверяют во вторую руку полевые журналы, контролируют качество полевых измерений и выводят средние значения направлений или углов на каждом пункте, подсчитывают невязки замкнутых и разомкнутых ходов, которые не должны превышать величины $2m_\beta\sqrt{n}$, где m_β — установленная Инструкцией средняя квадратическая ошибка измерения угла в полигонометрии данного разряда; n — число углов в ходе. Как исключение может быть допущена невязка до $2{,}5m_\beta\sqrt{n}$.

На исходных пунктах измеренный между двумя твердыми направлениями угол не должен отличаться от разности дирекционных углов этих направлений более чем на $2{,}5m_\beta$.

Среднюю квадратическую ошибку измерения угла по невязкам полигонов вычисляют по формуле

$$m_\beta = \sqrt{\frac{1}{r}\left[\frac{f_\beta^2}{n}\right]},$$

где r — число полигонов (ходов); n — число углов в отдельных полигонах (ходах); f_β — невязки полигонов (ходов). При $r < (2 - 3)$ вычислять m_β нецелесообразно, так как в этом случае она будет иметь малую достоверность.

Линейные измерения в полигонометрии 1 и 2-го разрядов. Параллактическая полигонометрия. Длины сторон в полигонометрии 1-го разряда измеряют с относительной погрешностью не более 1:10 000 малыми топографическими светодальномерами или подвесными мерными приборами.

Подвесными мерными приборами линии измеряют непосредственно путем многократного отложения проволоки или параллактическим способом, используя длину мерного прибора как постоянный параллактический базис.

В полигонометрии 2-го разряда стороны измеряют с относительной ошибкой не более 1:5000, разрешается применять оптические дальномеры, например Редта-002, обеспечивающие заданную точность.

Параллактический способ измерения линий, повышающий производительность труда по сравнению со способом непосредственного многократного отложения мерного прибора, заключается в построении базисной сети в виде параллактического звена с острыми углами, противолежащими короткому базису (рис. 1.9).

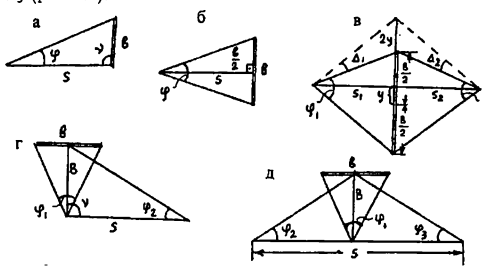


Рис. 1.9. Схемы параллактических звеньев полигонометрии:
а — звено треугольной формы; *б* — звено с симметричным расположением базиса относительно определяемой стороны; *в* — звено ромбической формы; *г* — сложное звено треугольной формы; *д* — сложное звено параллактической полигонометрии

Расстояние определяют тригонометрическим путем по точно измеренному малому базису и лежащему против него острому параллактическому углу и по измеренному с меньшей точностью прибазисному углу, который получается при пересечении базиса с определяемой линией.

В городских условиях и на строительных площадках в качестве базиса удобно применять двухметровые горизонтальные жезлы, изготавливаемые из инварного прута диаметром 8–12 мм, заключенного в дюралевую трубу диаметром 35–40 мм. Базисом является расстояние между визирными марками, укрепленными на концах инварного прута. Для установки жезла в горизонтальное положение используют круглый уровень, а в перпендикулярное к измеряемой линии — оптический визир.

Рассмотрим различные формы параллактических звеньев.

1. *Звено треугольной формы* (рис. 1.9, *а*). По теореме синусов

$$s = b\frac{\sin(\varphi + \nu)}{\sin\varphi}.$$

При $\nu \approx 90°$, $\sin(\varphi+\nu) \approx \cos\varphi \approx 1$, $\sin\varphi \approx \varphi$; $s \approx \frac{b}{\varphi}$; $\ln s = \ln b - \ln\varphi$,

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{m_\varphi}{\varphi}\right)^2.$$

2. *Звено с симметричным расположением базиса относительно определяемой стороны* (рис. 1.9, *б*). В прямоугольном треугольнике

$$s = \frac{b}{2}ctg\frac{\varphi}{2}, \quad \left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{m_\varphi}{\varphi}\right)^2.$$

3. *Звено ромбической формы* с *асимметричным базисом* (рис. 1.9, *в*). В этом случае

$$s = s_1 + s_2 = \frac{b+2y}{2}\left(ctg\frac{\varphi_1+\Delta_1}{2} + ctg\frac{\varphi_2+\Delta_2}{2}\right)$$

или

$$s_1 = \frac{b}{2}ctg\frac{\varphi_1}{2} - \Delta s_y; \quad s_2 = \frac{b}{2}ctg\frac{\varphi_2}{2} - \Delta s_y,$$

где $\Delta s_y = y^2/s,y$ — величина несимметрии базиса. Значение

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2=\left(\frac{m_b}{b}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{m_\varphi}{\varphi_{cp}}\right)^2.$$

4. *Звено ромбической формы с симметричным базисом* — частный случай звена ромбической формы с асимметричным базисом, когда $y=\Delta_1=\Delta_2=0$, в этом случае

$$s=s_1+s_2=\frac{b}{2}\left(ctg\frac{\varphi_1}{2}+ctg\frac{\varphi_2}{2}\right);$$

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2=\left(\frac{m_b}{b}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{m_\varphi}{\varphi_{cp}}\right)^2.$$

5. *Сложное звено треугольной формы* (рис. 1.9, *г*). По теореме синусов с учетом треугольника с базисом b получаем

$$s=B\frac{\sin(v+\varphi_2)}{\sin\varphi_2}=\frac{b}{2}ctg\frac{\varphi_1}{2}\frac{\sin(v+\varphi_2)}{\sin\varphi_2}.$$

При $v=90°$

$$s_1=\frac{b}{2}ctg\frac{\varphi_1}{2}ctg\varphi_2.$$

При $m\varphi_1=m\varphi_2=m\varphi$ и $m_b=0$ имеем

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2=\left(\frac{m_\varphi}{\rho}\right)\left(\frac{B^2}{b^2}+\frac{s^2}{B^2}\right).$$

6. *Сложное звено, изображенное* на рисунке 1.9, *д*, приводит к формулам

$$s=B\left(ctg\varphi_2+ctg\varphi_3\right)=bctg\frac{\varphi_1}{2}\left(ctg\varphi_2+ctg\varphi_3\right)$$

или

$$s=\frac{b}{tg\dfrac{\varphi_1}{2}}\left(\frac{1}{tg\varphi_2}+\frac{1}{tg\varphi_3}\right)=\frac{2b}{\varphi_1}\left(\frac{1}{\varphi_2}+\frac{1}{\varphi_3}\right).$$

Значение

$$m_s^2 = \left[\frac{2b}{\varphi_1^2}\left(\frac{1}{\varphi_2}+\frac{1}{\varphi_3}\right)\right]^2 m_{\varphi_1}^2 + \left(\frac{2b}{\varphi_1\varphi_2^2}\right)^2 m_{\varphi_2}^2 + \left(\frac{2b}{\varphi_1\varphi_3^2}\right)^2 m_{\varphi_3}^2 =$$

$$= \frac{s^2}{\varphi_1^2} m_{\varphi_1}^2 + \frac{s_1^2}{\varphi_2^2} m_{\varphi_2}^2 + \frac{s_2^2}{\varphi_3^2} m_{\varphi_3}^2.$$

Учитывая $s_1 \approx s_2 \approx \frac{s}{2}$, находим

$$m_s^2 = s^2\left(\frac{m_{\varphi_1}^2}{\varphi_1^2} + \frac{m_{\varphi_2}^2}{4\varphi_2^2} + \frac{m_{\varphi_3}^2}{4\varphi_3^2}\right).$$

Так как $\varphi_1 \approx \frac{b}{B}$, $\varphi_2 \approx \varphi_3 \approx \frac{2B}{s}$, то при $m_{\varphi_1} = m_\varphi$ имеем

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_\varphi}{\rho}\right)^2\left(\frac{B^2}{b^2} + \frac{s^2}{8B^2}\right).$$

Параллактические углы необходимо измерять с высокой точностью $m_\varphi = m_\beta = 1''$ теодолитами типа Т2. Для ослабления влияния длинно- и коротко-периодических ошибок делений лимба углы на визирные марки жезла целесообразно измерять на заранее выбранные части лимба, где ошибки в делениях минимальны, на этом же участке лимба нужно измерять параллактические углы и при компарировании жезла на полевом компараторе.

1.2.4. Способ бездиагональных четырехугольников

Этот способ удобен при развитии геодезической сети по проездам и просекам, а также при создании строительной сетки. В четырехугольнике без диагоналей необходимо измерить две стороны и все углы четырехугольника. На рисунке 1.10 в четырехугольнике измерены стороны a и b, нужно определить стороны c и d. Через точку B проведем линию BC, параллельную AD, а через точку E — линию EF, параллельную AB.



Рис. 1.10. Четырехугольник без диагоналей

Используя теорему синусов, имеем

$$c = DE + EC = a\frac{\sin A}{\sin D} + b\frac{\sin(C+D)}{\sin D} = \frac{a\sin A + b\sin(C+D)}{\sin D};$$

$$d = AF + FD = \frac{b\sin C}{\sin D} + \frac{a\sin(A+D)}{\sin D} = \frac{b\sin C + a\sin(A+D)}{\sin D}. \qquad (1.6)$$

В сложных сетях необязательно измерять стороны в каждом четырехугольнике, их можно определить из вычислений по полученным формулам. При равноточных угловых измерениях средние квадратические ошибки сторон определяют по формулам, полученным с учетом формул (1.6), и формулы средней квадратической ошибки функции:

$$m_c^2 = \left\{ m_a^2 \sin^2 A + m_b^2 \sin^2(C+D) + \frac{m_\beta^2}{\rho''^2} \right.$$

$$\left\{ a^2 \cos^2 A + b^2 \cos^2(C+D) + \right.$$

$$\left. \left. + [b\cos(C+D) - C\cos D]^2 \right\} \right\} \sin^{-2} D;$$

$$m_d^2 = \left\{ m_b^2 \sin^2 C + m_a^2 \sin^2(A+D) + \frac{m_\beta^2}{\rho''^2} \right.$$

$$\left\{ a^2 \cos^2(A+D) + b^2 \cos^2 C + \right.$$

$$\left. \left. + [a\cos(A+D) - d\cos D]^2 \right\} \right\} \sin^{-2} D.$$

Для прямоугольного четырехугольника с предварительно уравненными углами

$$m_c^2 = m_a^2 + bd\frac{m_\beta^2}{\rho''^2}; \quad m_d^2 = m_b^2 + ac\frac{m_\beta^2}{\rho''^2}.$$

Для квадрата

$$\frac{m_c^2}{c^2} = \frac{m_a^2}{a^2} + \frac{m_\beta^2}{\rho''^2}; \quad \frac{m_d^2}{d^2} = \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_\beta^2}{\rho''^2}.$$

В цепи прямоугольных четырехугольников, уравненных за условия фигур, в которой измерены стороны a и b,

$$m_c^2 = m_a^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho''^2}\sum_1^n b_i^2,$$

а в цепи квадратов

$$\left(\frac{m_c}{c}\right)^2 = \left(\frac{m_a}{a}\right)^2 + \frac{n m_\beta^2}{\rho''^2}.$$

1.2.5. Съемочная геодезическая сеть (съемочное обоснование)

Съемочную геодезическую сеть создают для сгущения геодезической плановой и высотной основы до плотности, обеспечивающей выполнение топографической съемки. Ее развивают от пунктов государственных геодезических сетей, геодезических сетей сгущения 1 и 2-го разрядов и технического нивелирования путем построения съемочных триангуляционных сетей, теодолитных и мензульных ходов, прямых, обратных и комбинированных засечек; определяют, как правило, положение точек в плане и по высоте.

Предельные ошибки положения пунктов плановой съемочной сети, включая и плановые опознаки, на открытой местности и на застроенной территории не должны превышать 0,2 мм в масштабе плана и 0,3 мм в масштабе плана на местности, покрытой древесной и кустарниковой растительностью.

Теодолитные ходы (рис. 1.11) с допустимыми относительными невязками $1/T\text{-}f_s/[s]$, где f_s — абсолютная невязка в теодолитном ходе; $[s]$ — длина хода между исходными пунктами, прокладывают с соблюдением требований, приведенных в таблице 5.

Таблица 5

Масштаб	m_s = 0,2 мм			m_s = 0,3 мм	
	$\frac{1}{T}=\frac{1}{3000}$	$\frac{1}{T}=\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{T}=\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{T}=\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{T}=\frac{1}{1000}$
	Допустимые длины ходов между исходными пунктами, км				
1:5000	6,0	4,0	2,0	6,0	3,0
1:2000	3,0	2,0	1,0	3,6	1,5
1:1000	1,8	1,2	0,6	1,5	1,5
1:500	0,9	0,6	0,3	–	–

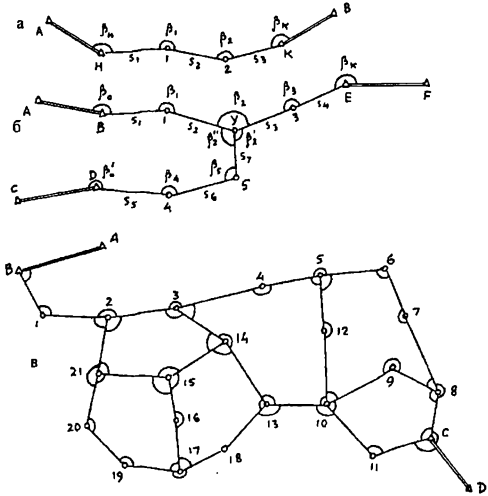


Рис. 1.11. Схемы теодолитных ходов: *а* — одиночного; *б* — с одной узловой точкой; *в* — с несколькими узловыми точками

Между узловыми точками или между узловыми и исходными пунктами предельные допустимые длины теодолитных ходов должны быть на 30% меньше приведенных в таблице 5.

Длины сторон в теодолитных ходах не должны быть: на застроенных территориях более 350 м и менее 20 м, на незастроенных — более 350 и менее 40 м. Допускается проложение висячих ходов, длины которых не должны быть более: 350 и 500 м при съемке в масштабе 1:5000; 200 и 300 м — в масштабе 1:2000; 150 и 200 м — в масштабе 1:1000 и 100 и 150 м — в масштабе 1:500. Первое число приведено для застроенных, а второе — для незастроенных территорий. Число сторон должно быть не более трех на застроенной территории и не более четырех — на незастроенной территории.

Угловые невязки в теодолитных ходах не должны превышать $f_\beta = \pm 1'\sqrt{n}$, где n — число углов в ходе. Углы измеряются одним полным приемом с перестановкой лимба между полуприемами на 90°. Колебания значений углов, полученных из двух полуприемов, не должны превышать 45″. Центрирование теодолитов выполняется оптическим центриром или отвесом с точностью 3 мм. При съемке в масштабе 1:10 000 можно увеличить допустимую длину ходов в 2 раза по сравнению с данными таблицы 5 для съемки в масштабе 1:5000.

В открытой местности взамен теодолитных ходов съемочные сети могут развиваться методами триангуляции (рис. 1.12), полярным способом, прямыми, обратными и комбинированными засечками (рис. 1.13). Между исходными сторонами (пунктами) допускается построение не более 20 треугольников для съемки в масштабе 1:5000, 17 — в масштабе 1:2000, 15 — в масштабе 1:1000 и 10 — в масштабе 1:500.

Углы измеряют теодолитами не менее 30-секундной точности двумя круговыми приемами с перестановкой лимба между приемами на 90°. Расхождение приведенных к общему нулю одноименных направлений из раз-

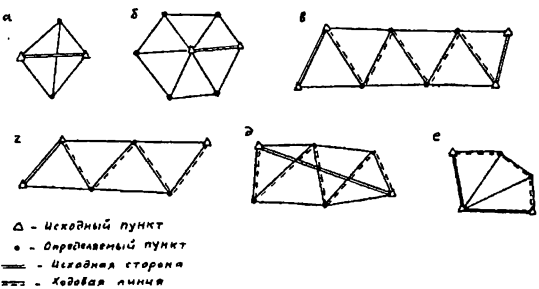


Рис. 1.12. Типовые фигуры триангуляции:
а — геодезический четырехугольник; *б* — центральная система; *в* — цепочка треугольников между двумя исходными сторонами; *г* — цепочка треугольников между исходной стороной и исходным пунктом; *д* — цепочка треугольников между двумя исходными пунктами; *е* — вставка в угол

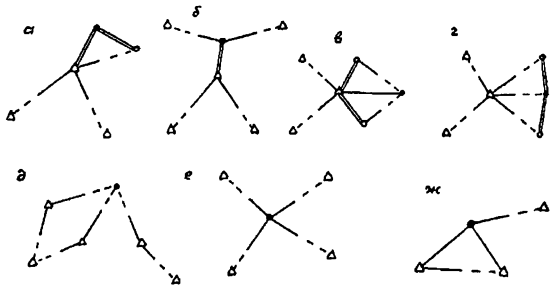


Рис. 1.13. Схемы определения координат пункта:
а–г — полярный способ; *д* — прямая засечка;
е — обратная засечка; *ж* — комбинированная засечка

ных приемов должно быть не более 45″, невязки в треугольниках — не более 1,5′.

Определение точек прямой засечкой выполняют не менее чем с трех пунктов опорной сети, при этом углы при определяемой точке не должны быть менее 30° и более 150°. Обратные засечки производят не менее чем по четырем опорным пунктам, комбинированные засечки — с участием не менее чем четырех исходных пунктов.

При развитии съемочной сети полярным способом электронными таксометрами длины линий допускается увеличивать до 1000 м. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных углов не должна превышать 15″.

1.2.6. Теодолитный и тахеометрический ходы. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости. Определение координат точек теодолитного хода

Теодолитным ходом (см. рис. 1.11) называют построенную на местности разомкнутую или замкнутую ломаную линию, в которой измерены все стороны и горизонтальные углы между ними, т. е. в основу теодолитного хода положен метод полигонометрии.

Тахеометрическим ходом называют построенную на местности разомкнутую или замкнутую ломаную линию, в которой измерены все стороны, горизонтальные углы между ними и вертикальные углы с каждой точки хода на смежные с ней точки.

По измеренным сторонам и углам определяют прямоугольные координаты вершин теодолитного или тахеометрического хода, а по измеренным вертикальным углам и длинам сторон — превышения между точками тахеометрического хода, т. е. теодолитным ходом определяют плановое положение вершин хода, а тахеометрическим ходом — плановое и высотное их положение. На рисунке 1.14 изображена часть теодолитного хода. Для точки 1 координаты

$$x_1 = x_H + \Delta x_1 = x_H + d_1 \cos\alpha_1;$$
$$y_1 = y_H + \Delta y_1 = y_H + d_1 \cos\alpha_1. \qquad (1.7)$$

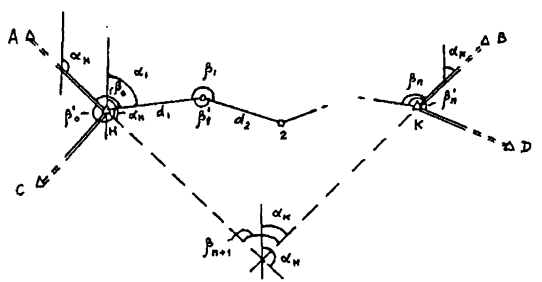


Рис. 1.14. Схема разомкнутого теодолитного хода

Формулы (1.7) решают ***прямую геодезическую задачу*** на плоскости, в которой при известных прямоугольных координатах x_H, y_H, горизонтальном проложении d и дирекционном угле α требуется определить координаты x_1, y_1 точки 1.

В обратной задаче по известным координатам x_1, y_1; x_2, y_2 точек 1 и 2 (рис. 1.15) требуется определить дирекционный угол α и горизонтальное проложение d. На рисунке 1.15 из прямоугольного треугольника 122′

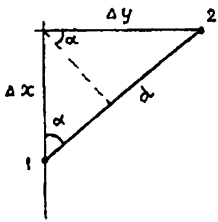


Рис. 1.15. Решение обратной задачи на плоскости

$$tg\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \qquad (1.8)$$

откуда находят дирекционный угол α. Горизонтальное проложение

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = (x_2 - x_1)\cos\alpha + (y_2 - y_1)\sin\alpha. \qquad (1.9)$$

Измерив горизонтальный угол β_0 между исходной и определяемой сторонами, на рисунке 1.14 имеем

$$\alpha_1 = \alpha_H - (180° - \beta_0) = \alpha_H + \beta_0 - 180°, \qquad (1.10)$$

если измерены левые по направлению теодолитного хода углы.

Если измерены правые углы β_0', β_1' и т.д., то, учитывая $\beta_0 = 360° - \beta_0'$, вместо формулы (1.10) находим

$$\alpha_1 = \alpha_H + 360° - \beta_0' - 180° = \alpha_H - \beta_0' + 180°. \qquad (1.11)$$

Следовательно, для определения координат точек теодолитного хода необходимо начинать ход с опорной точки, имеющей координаты x_H, y_H, и в этой начальной опорной точке измерить *примычный* угол β_0 и β_0' между линией с известным дирекционным углом и линией d_1 хода.

Разомкнутый теодолитный ход должен начинаться и заканчиваться на опорных точках H и K с известными координатами, и на этих точках должны быть измерены примычные углы β_0 и β_n между опорными линиями с известными дирекционными углами и первой и последней линиями хода. Только в этом случае имеется возможность не только определить координаты всех точек теодолитного хода, но и проконтролировать правильность измерения углов и сторон хода и оценить точность выполненной работы. Если разомкнутый теодолитный ход имеет исходные данные только с одной стороны (в начале или конце хода), то его называют *висячим теодолитным ходом*.

Для контроля целесообразно в начальной и конечной опорных точках измерять не по одному, а по два примычных угла, т. е. независимо дважды определять дирекционный угол сторон *HI* от опорной линии *AH* и опорной

линии *CH*, а в конечной опорной точке определять дирекционные углы опорных линий *KB* и *KД* и сравнивать полученные и известные их значения.

В замкнутом теодолитном ходе (рис. 1.16) обычно измеряют внутренние углы полигона (β_1,..., β_n) и примычные углы β_0', β_0''. Необходимость привязки замкнутого хода к двум твердым линиям связана с тем, что при ошибочном опознавании, например пункта А, дирекционный угол линии *АН* не будет соответствовать его действительному значению и весь полигон будет неправильно ориентирован относительно принятой системы координат. Поэтому для исключения такой ошибки необходимо делать привязку хода как минимум к двум опорным линиям.

Внутри замкнутого хода можно проложить *диагональный ход*, опирающийся на вершины основного хода (на рис. 1.16 ход 6-8-9-2).

В разомкнутом (рис. 1.14) и замкнутом (рис. 1.16) теодолитных ходах кроме необходимых для определения координат точек хода измерений выполнены избыточные измерения: в разомкнутом ходе избыточными являются примычные углы β_n, β_n'; угол β_{n-1} и сторона d_n, а в замкнутом — углы β_6, β_7 и d_7, что позволяет выполнить уравнивание и оценку точности этих ходов.

Известно, что каждое избыточное измерение приводит к условному уравнению, в рассматриваемом случае имеем три избыточных измерения, которые дают одно условное уравнение фигуры и условные уравнения абсцисс и ординат.

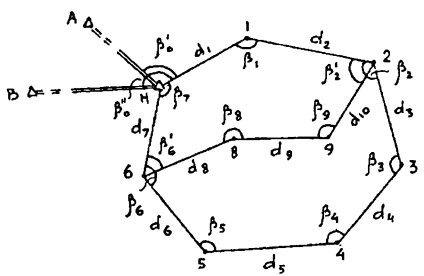


Рис. 1.16. Схема замкнутого и диагонального теодолитных ходов

В теодолитном ходе угловая невязка (свободный член условия фигур)

$$f_\beta = \sum_1^n \beta_{изм} - \sum_1^n \beta_{теор}, \qquad (1.12)$$

где $\sum_1^n \beta_{изм}$ — сумма измеренных в теодолитном ходе углов, а $\sum_1^n \beta_{теор}$ — их теоретическая сумма. В замкнутом теодолитном ходе с n измеренными углами, как известно из геометрии

$$\sum_1^n \beta_{теор} = 180°(n-2),$$

следовательно, в замкнутом теодолитном ходе

$$f_\beta = \sum_1^n \beta_{изм} - 180°(n-2). \qquad (1.13)$$

В разомкнутом теодолитном ходе теоретическая сумма углов зависит от расположения исходных сторон, и поэтому целесообразно разомкнутый ход превратить в замкнутый путем продолжения опорных линий до их пересечения и использовать его для определения $\sum_1^n \beta_{теор}$. На рисунке 1.14 для измеренных левых углов имеем

$$\sum_1^n \beta_{теор} = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \ldots + \beta_n.$$

В полученном замкнутом полигоне сумма углов

$$180° - \beta_0 + 360° - \beta_1 + 360° - \beta_2 + \ldots + 180° - \beta_n + \beta_{n+1} =$$

$$= 180°[(n+2) - 2] = 180°n,$$

где n — число измеренных углов. Из этого выражения находим

$$\sum_1^n \beta_{теор} = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \ldots + \beta_n =$$

$$= 180° \cdot 2 + 180° \cdot 2(n-1) - 180°n + \beta_{n+1} = 180°n + \beta_{n+1},$$

т. е. в рассматриваемом случае, учитывая

$$\beta_{n+1} = 180° - (\alpha_н - \alpha_к) = \alpha_к - \alpha_н + 180°,$$

получаем

$$f_\beta = \sum_1^n \beta_{изм} + \alpha_н - \alpha_к - 180°(n+1). \qquad (1.14)$$

На рисунке 1.17

$$\sum_1^n \beta_{теор} = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \ldots + \beta_n.$$

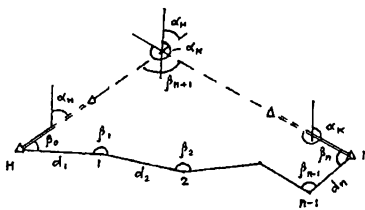


Рис. 1.17. Схема разомкнутого теодолитного хода

В полигоне

$$\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \ldots + \beta_{n+1} = 180°[(n+2) - 2] = 180°n.$$

Учитывая $\beta_{n+1} = 360° - (a_к - a_н)$, находим

$$\sum_1^n \beta_{теор} = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \ldots + \beta_n = 180°n - \beta_{n+1} = 180\ (n-2) + \alpha_к - \alpha_н,$$

а

$$f_\beta = \sum_1^n \beta_{изм} + \alpha_н - \alpha_к - 180°(n-2). \qquad (1.15)$$

Если ошибки угловых измерений носят случайный характер и значения $m_{\beta_1} \approx m_{\beta_i} \approx m_\beta$, то, используя формулу (1.13) и формулу средней квадратической ошибки функции, имеем

$$доп.f_\beta = \kappa m_\beta \sqrt{n}, \qquad (1.16)$$

где $к$ — коэффициент перехода от средней квадратической ошибки к предельной. При $к = 2$, $m_\beta = 30''$

$$доп. f_\beta = 1'\sqrt{n}.$$

Если фактическая f_β, вычисленная по формулам (1.13)–(1.15), по модулю меньше доп. f_β, то ее распределяют с обратным знаком поровну на все измеренные углы, т. е. поправка

$$v_{\beta_i} = -\frac{f_\beta}{n}. \qquad (1.17)$$

Если невязка f_β не делится без остатка на число n, то несколько большие поправки вводят в углы с короткими сторонами. В итоге сумма поправок должна равняться угловой невязке f_β с обратным знаком, т.е.

$$\sum_1^n v_{\beta_i} = -f_\beta.$$

После введения в углы β_i поправок v_{β_i} получают исправленные углы, которые используют при вычислении дирекционных углов по формуле (1.10) для левых и по формуле (1.11) для правых измеренных углов. При этом дирекционный угол конечной опорной линии, вычисленный по теодолитному ходу, и его истинное значение должны совпадать. В замкнутом ходе дирекционные углы опорных линий *НА* и *НВ* (рис. 1.16) после вычисления теодолитного хода также должны совпадать с их известными значениями. После определения дирекционных углов вычисляют приращения координат

$$\Delta x = d\cos\alpha,\ \Delta y = d\sin\alpha.$$

Вследствие ошибок при измерении углов и сторон $\sum_1^n \Delta x_{выч.}$ и $\sum_1^n \Delta y_{выч.}$ не совпадают с их теоретическими значениями $\sum_1^n \Delta x_{теор.}$ и $\sum_1^n \Delta y_{теор.}$, т. е. невязки по осям координат

$$f_x = \sum_1^n \Delta x_{выч.} - \sum_1^n \Delta x_{теор.},\quad f_y = \sum_1^n \Delta y_{выч.} - \sum_1^n \Delta y_{теор.}$$

Для определения $\sum_1^n \Delta x_{теор.}$ и $\sum_1^n \Delta y_{теор.}$ имеем

$$x_1 = x_н + \Delta x_1; \quad y_1 = y_н + \Delta y_1;$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_2; \quad y_2 = y_1 + \Delta y_2;$$

.....

$$x_п = x_{п-1} + \Delta x_п; \quad y_п = y_{п-1} + \Delta y_п.$$

Сложив левые и правые части полученных выражений, находим

$$x_п = x_н + \sum_1^n \Delta x_{теор.}; \quad y_п = y_н + \sum_1^n \Delta y_{теор.},$$

откуда

$$\sum_1^n \Delta x_{теор.} = x_п - x_н; \quad \sum_1^n \Delta y_{теор.} = y_п - y_н.$$

С учетом полученных значений

$$f_x = \sum_1^n \Delta x_{выч.} = (x_п - x_н), \quad f_y = \sum_1^n \Delta y_{выч.} - (y_п - y_н). \qquad (1.18)$$

В замкнутом теодолитном ходе начальная и конечная точки совпадают, поэтому $x_п = x_н$, $y_п = y_н$, а вместо формулы (1.18) имеем

$$f_x = \sum_1^n \Delta x_{выч.}, \quad f_y = \sum_1^n \Delta y_{выч.}.$$

Вследствие невязок f_x, f_y положение конечной опорной точки, полученной по теодолитному ходу, не будет совпадать с положением опорной точки, величина этого несовпадения, называемая *невязкой в периметре хода*,

$$f_x = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}.$$

Отношение f_s к периметру хода $\sum_1^n s$, т. е.

$$\frac{f_s}{\sum_1^n s} = \frac{1}{\sum_1^n s / f_s} = \frac{1}{T}$$

называют *относительной невязкой в периметре хода*, она характеризует качество полевых работ и не должна превышать установленной величины. При измерении длин сторон лентой или дальномерными насадками ДНТ, ДАР-100 и ДД-3 при неблагоприятных условиях

$$\frac{1}{T} \le \frac{1}{1500}.$$

При благоприятных условиях измерений относительная невязка может быть 1:2000 и даже 1:3000.

В тахеометрическом ходе при измерении сторон нитяным дальномером

$$\frac{1}{T} \le \frac{1}{700}.$$

Если относительная ошибка допустима, то в приращения координат вводят поправки

$$v_{\Delta x_i} = -\frac{fx}{\sum_1^n s} s_i; \quad v_{\Delta y_i} = -\frac{fy}{\sum_1^n s} s_i. \tag{1.19}$$

Суммы поправок должны быть равны соответствующим невязкам по осям с обратным знаком, т. е.

$$\sum_1^n v_{\Delta x_i} = -fx, \quad \sum_1^n v_{\Delta y_i} = -fy.$$

Исправленные значения приращений координат используют для определения координат точек хода по формулам

$$x_1 = x_н + \Delta x_1; \quad y_1 = y_н + \Delta y_1;$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_2; \quad y_2 = y_1 + \Delta y_2;$$

.....

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x_n; \quad y_n = y_{n-1} + \Delta y_n.$$

В результате x_n, y_n в разомкнутом и $x_n = x_к$, $y_n = y_к$ в замкнутом ходах должны совпадать с их известными для опорных точек значениями.

Пример вычисления координат пунктов разомкнутого теодолитного хода приведен в таблице 6. Схема хода изображена на рисунке 1.18.

Таблица 6

Пункты	Углы поворота (левые)	Дирекционные углы α	Горизонтальные проложения, м	Δx = dcosα, м	Δy = dsinα, м	Координаты, м	
						x	y
Панки	0,0						
		46° 18,2′					
Луч (1)	181° 15,6′			+4	–1	5141,15	819,31
	0,0	47° 33,8′	93,45	+63,06	+68,97		
2	247° 18,4′			+4	–1	5204,25	888,27
	0,0	114° 52,2′	154,12	–64,82	+139,83		
3	119° 38,9′			+4	–1	5139,47	1028,09
	0,0	54° 31,1′	121,85	+70,73	+99,22		
4	155°12,3′			+4	–2	5210,24	1127,30
	+0,1	29° 43,4′	114,19	+99,17	+56,62		
5	161° 46,3′			+4	–2	5309,45	1183,90
	+0,1	11° 29,8′	89,55	+87,75	+17,85		
Лес (6)	254° 45,3′					5397,24	1201,73
		86° 15,2′					
Ужово							
$\Sigma\beta_{изм}$ = 1119°56,8′			Рм = 573,16 м	$\Sigma\Delta x_{выч}$ = +255,89	$\Sigma\Delta y_{выч}$ = +382,49		
$\Sigma\beta_{т.пор} = 180°(7-2) + 2\cdot 180° - [180° - (\alpha_к - \alpha_н)]$ = 1119°57,0′				$\Sigma\Delta x_{теор}$ = +256,09	$\Sigma\Delta y_{теор}$ = +382,42		
$f_\beta = \Sigma\beta_{изм} - \Sigma\beta_{теор} = -0{,}2'$				fx = –0,20	fy = +0,07		
доп $f_\beta = 1'\sqrt{n} = 1'\sqrt{6} = 2{,}4'$				$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = 0{,}21$ м			
$f_{отн} = \frac{f_s}{P_м} = \frac{0{,}21}{573{,}16} = \frac{1}{2700}$, доп. $f_{отн} = \frac{1}{2000}$							

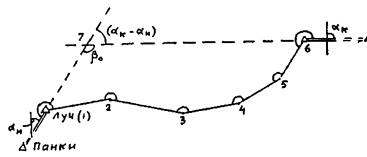


Рис. 1.18. Схема теодолитного хода

1.2.7. Вычисление отметок точек тахеометрического хода

Если расстояния D в тахеометрическом ходе измеряли нитяным дальномером, то по полученным углам наклона v и расстояниям D вычисляют превышения

$$h = \frac{1}{2} D \sin 2v + i - l + f, \qquad (1.20)$$

где i — высота прибора; l — высота визирной цели; f — поправка за кривизну Земли и рефракцию. Из прямых $h_{пр.}$ и $h_{обр.}$ превышений определяют среднее значение, если расхождение между $h_{пр.}$ не превышает 4 см на каждые 100 м расстояния между точками. Пример вычисления отметок точек тахеометрического хода приведен в таблице 7.

Высотная невязка

$$f_h = \sum_1^n h_{ср.} - \sum_1^n h_{теор.}.$$

В разомкнутом ходе

$$\sum_1^n h_{теор.} = H_к - H_н,$$

где $H_к$, $H_н$ — высоты конечного и начального опорных пунктов хода. С учетом этого

$$f_h = \sum_1^n h_{ср.} - (H_к - H_н),$$

Таблица 7

Точки хода	*D*, м	$h_{ср}$, м	v_h, м	$П_{н}$спр., М	*H*, м
Дорожный					155,24
	155,8	+3,74	+0,02	+3,76	
1					159,00
	178,5	–3,05	+0,02	–3,03	
2					155,97
	201,1	+2,77	+0,02	+2,79	
3					158,76
	144,7	+4,11	+0,01	+4,12	
4					162,88
	203,3	–1,94	+0,02	–1,92	
5					160,96
	147,6	–5,13	+0,02	–5,11	
Дубки					155.65

$P = 1031{,}0$ м $\sum_{1}^{n} h_{ср.} = 0{,}50$ м

$\sum_{1}^{n} h_{теор.} = 0{,}61$ м

$f_h = -0{,}11$ м

$доп.\ fh = 0{,}0004 Pм / \sqrt{n} = 0{,}0004 \cdot 1031{,}0 / \sqrt{6} = 0{,}17$ м

в замкнутом ходе $H_к = H_н$ и

$$f_h = \sum_{1}^{n} h_{ср.}.$$

Допустимая величина невязки (в метрах) согласно [6, с. 85]

$$доп. f_h \le 0{,}0004\, P_м / \sqrt{n},$$

где $P_м = \sum D$ — длина тахеометрического хода в м, n — число превышений в ходе.

Поправки

$$v_{h_i} = -\frac{f_h}{P} D_i.$$

Сумма поправок должна быть равна невязке с обратным знаком. Исправленные превышения используют для определения отметок

$$H_2 = H_н + h_1,$$
$$H_3 = H_2 + h_2,$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$H_к = H_n + h_n.$$

В замкнутом ходе $H_к \approx H_н$. В результате вычислений в разомкнутом ходе должна быть получена отметка $H_к$ конечной опорной точки, а в замкнутом — отметка $H_н$ начальной опорной точки.

Глава 1.3. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

1.3.1. Общие сведения о топографических съемках

Топографическая съемка состоит из комплекса полевых и камеральных работ, выполняемых для создания топографических карт и планов. В инженерной геодезии обычно выполняют съемки крупных масштабов: 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. На топографических планах изображают все предметы и рельеф местности, подземные и наземные коммуникации. Изображаемые на плане точки условно делят на твердые и нетвердые. Твердыми являются стабильные объекты с четкими границами (углы зданий, построенных из кирпича, бетона и других прочных материалов и т. п.). Нетвердые контуры не имеют четких границ, например, граница леса, луга и т. п.

На топографических планах изображают опорные плановые и высотные геодезические пункты, точки съемочного обоснования, с которых выполняют съемку. На специализированных планах изображают не все объекты местности, а в основном те, которые необходимы для решения специальных задач.

Имеется несколько видов съемки. При создании топографических карт и планов больших территорий в основном используют аэрофототопографические съемки, сущность которых сводится к фотографированию с самолета или другого носителя, включая и космические, участков местности. В зависимости от масштаба создаваемой карты используют специальные автоматизированные аэрофотоаппараты (АФА) с различным фокусным расстоянием и фотографирование выполняют с различных высот, при этом получают примерно горизонтальные снимки, масштаб которых определяют по формуле (рис. 1.19):

$$\frac{1}{m}=\frac{oa}{OA}=\frac{f}{H},$$

где m — знаменатель масштаба снимка; f — фокусное расстояние камер; H — высота фотографирования.

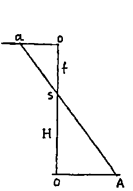


Рис. 1.19. К определению масштаба снимка

Комплекс процессов (фотографирование местности, полевые геодезические и камеральные фотограмметрические работы), позволяющий по снимкам местности создавать топографические карты, называют *фототопографической съемкой*. В зависимости от способов фотографирования местности имеются следующие виды фототопографической съемки:

наземная, использующая снимки местности, полученные фототеодолитом с точек земной поверхности, ее называют также фототеодолитной;

аэрофототопографическая, в которой снимки местности получают с самолета или другого носителя съемочной аппаратуры;

комбинированная, представляющая собой сочетание аэрофототопографической и наземной фототопографической съемок; местность фотографируют дважды; фототеодолитом с наземных станций и аэрофотоаппаратом с самолета; по наземным снимкам сгущают опорную геодезическую сеть, а по аэрофотоснимкам составляют топокарту;

космическая, при которой снимки получают с космических кораблей и искусственных спутников.

Существуют два метода создания оригиналов карт:

комбинированный, в котором для составления контурной части топокарты используют одиночные снимки, а рельеф рисуют по результатам полевых измерений;

стереотопографический, позволяющий, используя свойства пары снимков, в камеральных условиях получать контурную и рельефную части топокарты. Этот метод дает возможность независимо от времени и погодных условий детально изучать местность, включая и малодоступную, по снимкам в камеральных условиях, механизировать и автоматизировать все процессы создания топокарт, обеспечивает высокое качество при минимальных затратах сил и средств и вследствие этого является основным методом картографирования.

В стереотопографическом методе топокарты создают универсальным и дифференцированным способами. *Универсальный* способ позволяет полностью составлять топокарту на одном приборе. *Дифференцированный* способ решает эту задачу на нескольких приборах: на фототрансформаторе снимки приводят к заданному масштабу и освобождают от искажений за углы наклона снимка и рельеф местности, на стереометре рисуют рельеф, на проекторе переносят контуры и горизонтали на планшет и т. д.

Общая технологическая схема создания топографических карт по аэрофотоснимкам местности включает следующие процессы:

- фотографирование местности и обработку материалов фотосъемки;
- геодезические полевые работы по привязке снимков;
- дешифрирование снимков, т.е. распознавание изображенных предметов местности и получение их необходимых характеристик;
- фотограмметрические работы.

В настоящее время широкое применение имеют фотограмметрические станции, которые по строгим формулам стереофотограмметрии позволяют обрабатывать цифровые снимки, полученные непосредственно цифровыми камерами или полученные с помощью сканеров из обычных фотоснимков.

Топографические карты и планы сравнительно небольших участков местности получают следующими способами.

Теодолитная съемка, которая состоит из полевых угловых и линейных измерений, по которым в камеральных условиях определяют положение предметов местности относительно вершин и сторон теодолитного хода, т. е. создают контурный план местности, на котором изображают предметы местности (ситуацию) без рельефа.

Тахеометрическая съемка — метод создания топографических планов местности по результатам угловых и линейных измерений на местности относительно вершин и сторон тахеометрического хода. При тахеометрической съемке плановое и высотное положение точек в основном определяют методом пространственных полярных координат, т. е. путем наведения перекрестия нитей на рейку, поставленную на определенную точку, и измерения горизонтальных углов с вершиной в точке тахеометрического хода относительно опорной линии (стороны тахеометрического хода), вертикальных углов относительно горизонтальной плоскости, проходящей через вершину угла, и расстояния до снимаемой точки.

Мензульная съемка — способ создания топографических карт и планов в полевых условиях на мензуле, состоящей из штатива, подставки и планшета, путем определения положения и высоты точки полярным методом. Измерения выполняют кипрегелем, состоящим из зрительной трубы, вертикального круга, смонтированных на колонке, которая закреплена на линейке, скошенный край которой параллелен визирной оси трубы. Перекрестие сетки нитей наводят на определяемую точку (рейку), при этом скошенный край линейки должен проходить через изображение на планшете точки стояния мензулы; нитяным дальномером измеряют расстояние, приводят его к горизонтальному проложению и откладывают в масштабе плана от точки-станции на планшете по направлению скошенного края линейки и таким образом получают определяемую точку на планшете.

Высоты точек находят путем измерения вертикального угла, высоты прибора и высоты визирной цели, по формуле (1.20).

Нивелирование поверхности — один из способов топографической съемки, при котором на местности по определенному правилу располагают точки, высоты которых определяют геометрическим нивелированием. Наибольшее практическое применение имеет метод квадратов и метод магистралей с поперечными профилями. Создание плана по результатам нивелирования по квадратам начинают с разбивки в заданном масштабе сетки квадратов, у каждой выписывают округленную до сантиметра высоту. Согласно абрису наносят и вычерчивают в условных знаках ситуацию, а затем путем интерполирования горизонталями изображают рельеф.

1.3.2. Теодолитная съемка

Теодолитную съемку обычно используют при создании контурных планов небольших участков местности. Положение точек относительно опорных точек и сторон в полевых условиях определяют несколькими способами, основными из которых являются следующие.

1. Способ перпендикуляров используют для съемки точек, расположенных на открытой местности вблизи сторон теодолитного хода. Для определения положения углов здания $к_1$, $к_2$, $к_3$ достаточно опустить на линию 23 теодолитного хода перпендикуляры и измерить расстояния d_1, d_2, d_3 от твердой точки 2 по линии теодолитного хода до оснований перпендикуляров и длины перпендикуляров p_1, p_2, p_3 (рис. 1.20). При построении плана по линии 23 теодолитного хода, положение точек которого нанесено на план, в масштабе плана откладывают отрезки d_1, d_2, d_3, т. е. получают положение оснований перпендикуляров, в которых восстанавливают перпендикуляры и по ним откладывают в масштабе плана значения p_1, p_2, p_3 и таким образом получают на плане точки $к_1$, $к_2$, $к_3$ углов здания. Соединив эти точки, имеем изображение двух стен здания, изображение остальных двух стен получают, прочертив линии, параллельные $к_2к_3$ и $к_1к_2$. Таким образом, на плане получаем положение здания. Аналогичным способом можно получить изображение на плане и других объектов местности.

Перпендикуляры измеряют рулеткой, а расстояние от твердой точки до основания перпендикуляра отсчитывают по стальной ленте, уложенной в створе линии 23 теодолитного хода с помощью теодолита, установленного над точкой 2. При небольшой длине перпендикуляров (не более 4, 6, 8 м при съемках в масштабах 1:500, 1:1000, 1:2000) их восстанавливают «на глаз». При больших длинах перпендикуляров прямой угол строят экером (рис. 1.21), и длины перпендикуляров при отмеченных масштабах можно увеличить до 20, 40, 60 м.

Из экеров различных конструкций наибольшее распространение получил двухзеркальный экер. Внутри металлического корпуса 1 с прямоугольными окошками 2, под которыми на внутренних сторонах укреплены зеркала 3 под углом $\gamma = 45°$ относительно друг друга. Через окошко наблюдатель смотрит на веху, установленную на точку *N*. Перемещая экер по линии *MN*, находят такое положение, когда отраженное от двух зеркал изображение вехи над точкой *K* будет совпадать с направлением на веху в точке *N*, что будет соответствовать положению экера в вершине прямого угла *NKK*, эту вершину через середину ручки 4, крючок 5 проектируют отвесом 6 на ленту (земную поверхность).

На рисунке 1.21, *б* угол

$$\gamma = 180° - (90° - \alpha) - (90° - \beta) = \alpha + \beta,$$

а угол

$$\varepsilon = 2\alpha + 2\beta = 2(\alpha + \beta),$$

т. е.

$$\varepsilon = 2\gamma.$$

При $\gamma = 45°$ $\varepsilon = 90°$, т. е. *NкK* (см. рис. 1.21, а) равен 90°.

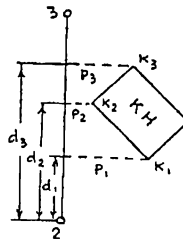


Рис. 1.20. Способ перпендикуляров

2. Способ линейной засечки используют для съемки точек путем измерения отрезков s_1, s_2 с точек *a* и *b* (рис. 1.22, а). Точки *a* и *b* на линии 12 теодолитного хода выбирают так, чтобы угол засечки при определенной точке *K* был в пределах 30–150°, отрезки s_1, s_2 не превышали 50 м. На плане сначала получают точки *a* и *b*, из этих точек как из центров радиусами s_1 и s_2 в масштабе плана проводят дуги окружностей, пересечение которых дает положение точки *K* на плане.

3. Способ полярных координат является наиболее используемым при съемке точек. Принимая точку теодолитного хода 1 за полюс (рис. 1.22, б), а линию 12 — за полярную ось, теодолитом, установленным над точкой 1, одним полуприемом измеряют угол β_i, а дальномером, лентой или рулеткой — отрезок s_i. В таблице 8 приведены максимальные расстояния в способе полярных координат при выполнении теодолитной съемки.

Обычно с одной вершины хода снимают несколько точек местности, в этом случае целесообразно лимб теодолита ориентировать по линии хода 12, для чего вращением алидады совмещают нулевые деления лимба и алидады, затем закрепляют алидаду и открепляют винт лимба и вращением лимба вместе с алидадой перекрестие нитей сетки наводят на точку 2. Следовательно, при наведении на точку 2 теодолитного хода отсчет по горизонтальному кругу будет равен нулю и при наведении на точку *i* отсчет будет равен полярному углу β_i.

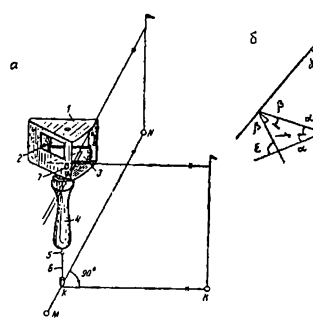


Рис. 1.21. Экер

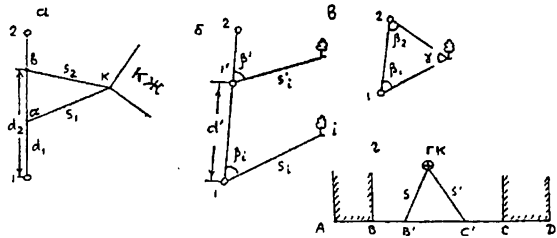


Рис. 1.22. Схемы съемки контуров способами: *а* — линейной засечки; *б* — полярным; *в* — угловой засечки; *г* — створов

Таблица 8

Метод определения расстояния и масштаб съемки	Расстояния до контуров, м	
	четких	нечетких
При измерении нитяным дальномером		
1:2000	100	150
1:1000	60	100
1:500	40	80
При измерении лентой или оптическим дальномером		
1:2000	250	300
1:1000	180	200
1:500	120	150

Съемку методом полярных координат можно выполнять не только с точек теодолитного хода, но и с любой точки на его стороне. На рисунке 1.22, б это точка 1′, полученная путем откладывания расстояния $d' = 11'$ в прямом и обратном направлениях.

4. Способ угловой засечки используют при съемке удаленных труднодоступных местных предметов (трубы, шпили, антенны и т. п.). Определяемая точка получается путем пересечения направлений из двух и более точек теодолитного хода (для контроля — не менее чем с трех направлений). Углы β_1 и β_2 (рис. 1.22, в) измеряют теодолитом, при этом угол γ при определенной точке Т должен быть в пределах 30–150° (наилучшая засечка при $\gamma = 90°$).

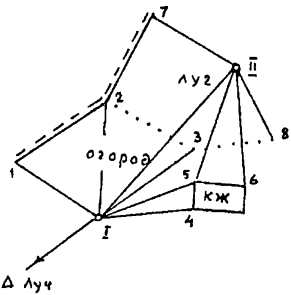


Рис. 1.23: Абрис теодолитной съемки

№ точки	Угол	Расстояние, м
Станция I		
Луч	0°00′	
1	66 17	53,4
2	127 15	55,3
3	18051	56,3
4	21232	40,7
5	197 11	44,9
Станция II		
F	0°00′	
6	315 13	47,4
7	81 11	38,7
8	291 14	29,6

5. Способ створов обычно применяют при внутриквартальной съемке, когда съемка основных контуров выполнена. Створом может быть линия, соединяющая две твердые точки или два твердых контура (рис. 1.22, г). Путем линейных измерений на линии створа получают точки *B′*, *C′*, из которых линейной засечкой (или другим способом) получают снимаемую точку. Кроме съемки всех точек ситуации для уточнения составленного плана выполняют обмеры по фасадам всех строений, заборам и т. п. На перекрестках проездов измеряют диагональные расстояния между углами кварталов и ширину проездов. Контрольные промеры делают между смотровыми колодцами подземных коммуникаций, мачтами, столбами воздушных линий связи и т. п.

При теодолитной съемке заполняется *абрис* — схематический чертеж, на котором изображают вершины и створы теодолитного хода, снятую с них ситуацию, записывают результаты угловых и линейных измерений (рис. 1.23). Абрис составляют непосредственно во время съемки. При составлении абриса на нескольких листах должно быть перекрытие изображения, т. е. последующий лист должен начинаться с точек, которыми закончился предыдущий. Абрис является исходным документом для составления плана теодолитной съемки, поэтому его нужно составлять четко, аккуратно, чтобы при его использовании не было разночтений и неопределенностей.

Камеральные работы

На листе плотной бумаги с помощью координатографа, линейки Ф. В. Дробышева или другим методом строят прямоугольную сетку квадратов со сторо-

нами 100 мм. Наиболее доступным способом построения сетки является проведение через поле листа двух диагоналей, от пересечения которых откладывают одинаковые отрезки. Соединив концы отрезков, получают прямоугольник, на сторонах которого откладывают стороны квадратов, при этом квадраты должны располагаться так, чтобы после их оцифровки изображение теодолитного хода и снимаемого участка было примерно в середине листа бумаги. По координатам наносят точки теодолитного хода, а затем (по данным абриса) составляют план, используя условные знаки для планов данного масштаба.

1.3.3. Тахеометрическая съемка

Тахеометрическая съемка используется при создании топографических планов небольших территорий в масштабах 1:500–1:5000, когда применение других методов неэффективно, ее часто используют для съемки полосы линейных сооружений: трубопроводов, дорог, каналов и т. п. При съемке в масштабе 1:500 линии в тахеометрических ходах измеряют лентой.

При тахеометрической съемке определяют плановое и высотное положение точек местности относительно пунктов съемочного обоснования. Плановое положение определяют полярным способом, а высотное — тригонометрическим нивелированием, при этом расстояние измеряют нитяным дальномером, горизонтальные углы — относительно опорных линий, вертикальные — относительно горизонтальной плоскости, все измерения выполняют при одной установке рейки, что ускоряет выполнение съемки (тахеометрия в переводе — быстрые измерения).

Расстояние от точек тахеометрических ходов (съемочных станций) до пикетов и расстояния между пикетами не должны превышать допусков, приведенных в таблице 9.

Тахеометрическую съемку целесообразно выполнять электронными или номограммными тахеометрами, позволяющими автоматически получать превышения и горизонтальные проложения.

При съемке прибор устанавливают над опорной точкой (точкой съемочного обоснования), приводят его в рабочее положение, т. е. центрируют, горизонтируют, устанавливают зрительную трубу «по глазу» и «по предмету». Лимб ориентируют по одной из сторон тахеометрического хода (съемочной сети), примыкающей к данной станции. Рулеткой или рейкой измеряют с точностью до 0,01 м высоту прибора i. Намечают пикеты, расстояния между которыми для различных масштабов не должны превышать величин, приведенных в таблице 9.

Пикеты, или реечные точки, должны располагаться на характерных точках рельефа и ситуации, их нужно выбирать тщательно, чтобы минимальное количество пикетов позволило выполнить съемку ситуации и рельефа на

Таблица 9

Масштаб съемки	Сечение рельефа, м	Максимальное расстояние между пикетами, м	Максимальное расстояние от прибора до рейки при съемке рельефа, м	Максимальное расстояние от прибора до рейки при съемке контуров, м
1:5000	0,5	60	250	150
	1,0	80	300	150
	2,0	100	350	150
	5,0	120	350	150
1:2000	0,5	40	200	100
	1,0	40	250	100
	2,0	50	250	100
1:1000	0,5	20	150	80
	1,0	30	200	80
1:500	0,5	15	100	60
	1,0	15	150	60

данной станции. Рейку поочередно устанавливают на пикеты, по рейке при одном положении вертикального круга определяют дальномерное расстояние D и берут отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам (при круге П и Л) и записывают их в журнал тахеометрической съемки. При измерении вертикального угла перекрестие нитей сетки наводят на отмеченную на рейке высоту прибора i или на верх рейки. Если пикет является только контурной точкой, то вертикальный угол не измеряют.

При съемке равнинной местности целесообразно отметки пикетов определять методом геометрического нивелирования, для чего на зрительную трубу прикрепляют уровень, путем поверки и юстировки визирную ось трубы устанавливают параллельно оси цилиндрического уровня. Иногда рядом с теодолитом устанавливают нивелир, теодолитом определяют плановое положение пикетов, а нивелиром — их отметки, при этом определяют горизонт прибора (нивелира)

$$ГП = H_{ст.} + a_c,$$

где $H_{ст.}$ — отметка станции; a_c — отсчет по рейке, установленной на станции. В этом случае

$$H = ГП - a,$$

где a — отсчет по рейке, установленной на пикете.

Превышение h определяют по дальномерному расстоянию и углу наклона v, используя формулу

$$h = \frac{1}{2} D \sin 2v + i - 1 = h' + i - 1,$$

где $h' = 0{,}5D\sin 2v$. Отметка пикета

$$H = H_{ст.} + i - l + h' = H'_{ст.} + h',$$

где $H'_{ст.} = H_{ст.} + i - l$.

На каждой станции необходимо определять место нуля ($МО$) вертикального круга. Если $МО$ не привели к величине, близкой к нулю, то его округляют до целых минут и угол наклона определяют по формуле, соответствующей конструкции теодолита. Для теодолита 2Т-30

$$v = Л - МО = МО - П = 0{,}5(Л - П);\ МО = 0{,}5(Л + П).$$

Вычисления целесообразно выполнять на микрокалькуляторе.

В таблице 10 приведен журнал тахеометрической съемки.

Съемку пикетов целесообразно выполнять по мере возрастания горизонтальных углов. Абрис тахеометрической съемки (кроки) ведут одновременно с журналом. На абрисе (рис. 1.24) показывают положение станции, направление на предыдущую и последующую точки тахеометрического хода, положение всех пикетов, их обозначают теми же номерами, что и в журнале. Ситуацию изображают условными знаками, рельеф — горизонталями. Между точками стрелками показывают понижение рельефа и возможность интерполирования горизонталей между этими пикетами.

После окончания работы на станции проверяют ориентирование лимба теодолита, визируя на предыдущую точку хода. Если отсчет отличается от начального более чем на 5′, съемку на этой станции переделывают. Для контроля на каждой станции определяют несколько пикетов на полосе съемки ее смежной станции.

Построение плана по результатам тахеометрической съемки начинают с вычерчивания координатной сетки и нанесения по координатам точек хода. Правильность нанесения точек контролируют по длинам сторон между точками, выраженными в масштабе плана, они не должны отличаться от соответствующих расстояний на плане более чем на 0,2 мм.

После этого с помощью транспортира, масштабной линейки и циркуля-измерителя по данным журнала наносят на план пикеты. Направления на

Таблица 10

Дата _____ Теодолит 2Т-30 Станция II. Высота прибора

Наблюдатель _____ i = 1,46 м. Отметка станции

$H_{ст.}$ = 131,15 м. МО = +2′

Точка	Отсчет по дальномеру, м	Отсчеты по кругам		v = МО – П	$d = D\cos^2 v$, м	$h' = \frac{D}{2}\sin^2 v$, м	l, м	$h = h' + i - l$	$H = H_{ст.} + h$, м	Примечание
		горизонтальному	вертикальному							
		° ′	° ′							
Ст. 1		0 00	Круг П							
1	47,4	17 31	2 04	–2 02	47,3	–1,68	3,00	–3,22	127,9	развилка дорог
2	118,7	58 46	1 14	–1 12	118,7	–2,49	3,00	–4,03	127,1	дорога
3	97,7	63 15	2 17	–2 15	97,5	–3,83	3,00	–5,37	125,8	рельеф
4	81,5	103 17	0 10	–0 08	81,5	–0,19	3,00	–1,73	129,4	рельеф
5	144,7	159 11	2 12	–2 10	144,5	–5,47	3,00	–7,01	124,1	урез воды реки
Ст. 1		0 00								

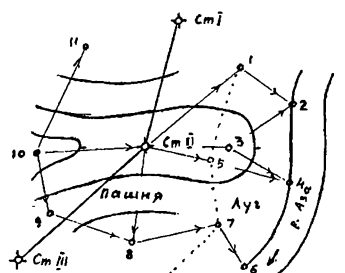


Рис. 1.24. Абрис тахеометрической съемки

пикеты со станции наносят по транспортиру. Например, при съемке со станции *II* ориентирование лимба выполнено по линии *II–I*, транспортир прикладывают центром к точке *II* плана, а отсчет 0°00′ совмещают с линией *II–I*. Отложив 17°3Г, получают направление на пикет *I*, по которому откладывают от станции *II* горизонтальное проложение 47,3 м в масштабе плана. Аналогичным образом наносят и другие пикеты. Для ускорения целесообразно сначала нанести все направления, подписывая у каждого номер пикета, затем прочертить направления и по ним отложить горизонтальные проложения в масштабе плана. Рядом с полученными точками из журнала выписывают отметки пикетов. По отметкам станций и пикетов проводят горизонтали с принятым сечением.

Контуры и рельеф на плане вычерчивают тушью согласно условным знакам. Над северной рамкой делают надпись, характеризующую участок местности (его название), например, «Топографический план поселка Луч, построенный по материалам тахеометрической съемки», над южной рамкой подписывают численный масштаб, высоту сечения рельефа, при необходимости вычерчивают линейный масштаб и график заложений.

Автоматизация тахеометрической съемки связана с появлением электронных тахеометров (ЭТ). ЭТ устанавливают на станции, на пикетах ставят специальные вешки с отражателями, при наведении на которые автоматически определяют расстояние, горизонтальный и вертикальный углы. МикроЭВМ тахеометра по результатам измерений вычисляет приращение координат Δx, Δy и превышение h с учетом всех поправок. Результаты измерений могут вводиться в специальное запоминающее устройство (накопитель информации), из которого информация поступает на ЭВМ, и по специальной программе выполняется окончательная обработка результатов измерений с получением данных, необходимых для построения цифровой модели местности или топографического плана. Графическое изображение топографического плана может быть выполнено графопостроителем, соединенным с ЭВМ.

1.3.4. Мензульная съемка

Для создания топографического плана местности с помощью мензульной съемки используют мензулу и кипрегель (рис. 1.25). Мензулу устанавливают над станцией, ориентируют и центрируют, т. е. центровочной вилкой изображение станции на планшете и ее положение на местности располагают на одной и той же отвесной линии. При ориентировании планшет поворачивают так, чтобы линии между опорными точками на планшете и их горизонтальные проложения на местности были параллельны между собой (рис. 1.26).

Для ориентирования скошенный край линейки кипрегеля прикладывают к линии *ab* на планшете, мензулу поворачивают до совпадения перекрестия

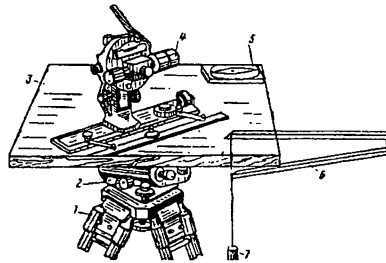


Рис. 1.25. Устройство мензулы и кипрегеля: 1 — штатив; 2 — подставка; 3 — планшет; 4 — кипрегель; 5 — буссоль; 6 — центрировочная вилка; 7 — отвес

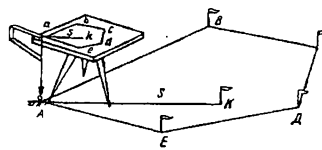


Рис. 1.26. Схема мензульной съемки

нитей трубы кипрегеля с точкой *B* на местности. После ориентирования проверяют центрировку прибора и при необходимости, особенно при крупномасштабной съемке, корректируют центрировку.

Плановое положение точек местности определяют полярным способом графически путем наведения перекрестия нитей зрительной трубы кипрегеля на пикет, при этом скошенный край линейки должен совпадать с изображением станции на планшете. Определив расстояние *D* нитяным дальномером, вычислив горизонтальное проложение и отложив его в масштабе плана от станции по направлению скошенного края линейки, получают на планшете положение пикета. Определив превышение и, в итоге, отметку пикета по методике тахеометрической съемки, подписывают ее величину у пикета. Таким способом получают на планшете характерные точки ситуации и рельефа, условными знаками изображают ситуацию, а горизонталями — рельеф местности.

Кроме полярного способа при определении планового положения точек применяют метод угловых засечек. Превышение *h* в этом случае определяют по формуле

$$h = dtgv + i - l + f,$$

где d — горизонтальное проложение между станцией и пикетом, измеряют на планшете и с учетом масштаба плана определяют его значение на местности; v — угол наклона. При этом можно наводить перекрестие нитей непосредственно на точку местности, т. е. выполнять съемку без участия рейки, в этом случае $1 = 0$.

Мензульная съемка с одновременной съемкой ситуации и рельефа в настоящее время применяется редко, обычно ее используют для съемки рельефа на готовых контурных планах или фотопланах (комбинированная съемка).

1.3.5. Нивелирование поверхности

Топографическую съемку небольших участков равнинной местности с небольшим количеством контуров при высоте сечения рельефа через 0,1; 0,25; 0,5 м выполняют нивелированием поверхности по квадратам, прямоугольникам, характерным линиям рельефа и т. п. Отметки пикетов во всех способах определяют геометрическим нивелированием, различие состоит в методе определения планового положения точек.

При нивелировании по квадратам теодолитом и мерным прибором на местности разбивают сетку квадратов, в вершинах квадратов забивают колышки. Сначала строят квадраты со сторонами 100, 200 или 400 м, а затем получают более мелкие квадраты со сторонами 40 м при съемке в масштабе 1:2000, 20 м — при съемке в масштабе 1:1000 и 1:500. При разбивке квадратов выполняют съемку ситуации. Результаты съемки фиксируют в абрисе (рис. 1.27).

Нивелир устанавливают так, чтобы с меньшего количества станций выполнить съемку всего участка. Установив нивелир на станции I, берут отсчет по рейке, поставленной на опорной высотной точке (например на Рп I) и вычисляют

$$ГП = Нрп + а,$$

где $Нрп$ — отметка репера; $а$ — отсчет по рейке, установленной на репере.

У номеров вершин квадратов выписывают отсчеты по рейкам, установленным на них, в абрисе штриховыми линиями показывают, на какие вершины квадратов выполнено нивелирование с данной станции. Отметки вершин квадратов вычисляют по формуле

$$H_i = ГП - a_i.$$

Подобным образом выполняют нивелирование и с других станций с обязательным определением ГП на каждой станции по опорным высотным пунктам или связующим точкам. С каждой последующей станции нивелируют не-

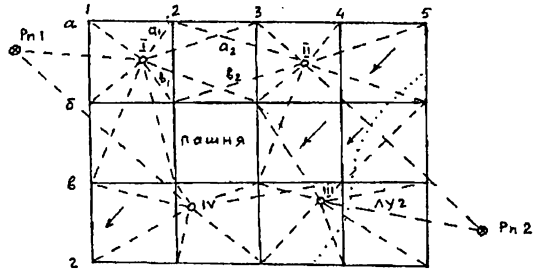


Рис. 1.27. Абрис нивелирования поверхности по квадратам (стрелками показано направление скатов)

сколько связующих точек, при этом (см. рис. 1.27) $a_1 + b_2 = a_2 + b_1$, расхождение между этими суммами не должно превышать 10 мм.

При нивелировании по параллельным линиям прокладывают параллельные магистральные ходы, часто по характерным линиям рельефа, по обе стороны от каждого хода разбивают перпендикулярные линии (поперечники). По ходам и поперечникам через 40 м при съемке в масштабе 1:2000 и 20 м — при съемке в масштабах 1:1000 и 1:500 закрепляют пикеты и снимают ситуацию. Высоты пикетов определяют геометрическим нивелированием.

1.3.6. Цифровые и математические модели местности

В последние годы в связи с переходом на автоматизированные методы проектирования кроме топографических планов и карт на бумажных носителях широко используют цифровые и математические модели местности.

Цифровая модель местности (ЦММ) — множество точек с координатами x, y, z и различными кодовыми обозначениями для аппроксимации рельефа местности и других характеристик. В более общем случае используют сочетание цифровых моделей, характеризующих ситуацию, рельеф, гидрологические, инженерно-геологические, технико-экономические и другие показатели.

При решении различных задач на ЭВМ используют математическую интерпретацию цифровых моделей, ее **называют математической моделью**

местности (МММ). ЦММ и МММ используют как исходную информацию при автоматизированном проектировании, при этом затраты труда и времени сокращаются в десятки раз по сравнению с использованием для этих целей топографических карт.

При цифровом моделировании местности могут использоваться регулярные, нерегулярные и статистические ЦММ [19].

Регулярные ЦММ состоят из множества точек с известными координатами, расположенных в узлах геометрических сеток различной формы, чаще в виде сети квадратов (рис. 1.28, *а*) или равносторонних треугольников (рис. 1.28, *б*). Используют также ЦММ на поперечниках к магистральному ходу (рис. 1.28, *в*).

Если на район работ имеются крупномасштабные карты и планы, то создают ЦММ в виде массива точек, расположенных через определенные интервалы на горизонталях, путем перемещения визира дигитайзера по горизонтали (рис. 1.28, *г*). Для этой же цели могут использоваться стереофотограмметрические приборы, когда массив точек формируют в процессе рисовки горизонталей.

Кроме того, используют массивы исходных точек, расположенных по характерным точкам рельефа местности (рис. 1.28, *д*), когда между парой соседних точек возможна линейная интерполяция высот.

Статистические ЦММ состоят из массива исходных точек, полученных по законам случайного распределения, близкого к равномерному, с использованием нелинейной интерполяции высот поверхностями второго, третьего и т. д. порядка.

Цифровое и математическое моделирование существенно изменило методы изыскания и проектирования строительных объектов.

1.3.7. Топографическая съемка в масштабе 1:200

Необходимость иметь топографические планы масштаба 1:200 связана с плотной городской застройкой в крупных городах, с проектированием объектов на действующих предприятиях, с большой насыщенностью городских территорий подземными коммуникациями, с потребностями городского кадастра, в связи со строительством и реконструкцией крупных промышленных предприятий и т. п.

Согласно [4] «топографическая съемка в масштабе 1:200 выполняется на отдельных участках промышленных предприятий и улиц (проездов, переходов) городов с густой сетью подземных и наземных сооружений, на участках со сложными природными и техноприродными процессами и др. Технические требования к ее выполнению должны устанавливаться в задании заказчика».

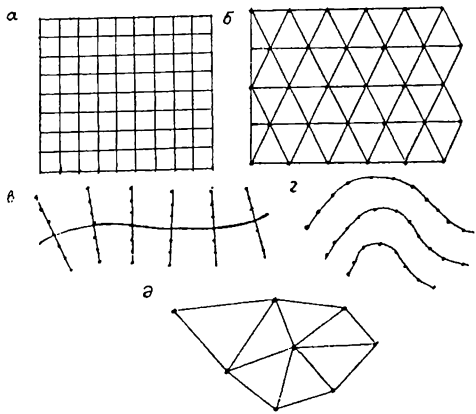


Рис. 1.28. Схемы цифровых моделей местности

В работе [15] показано, что: «1) СКО положения пунктов плановой съемочной сети относительно пунктов государственной геодезической сети и геодезических сетей сгущения не должны превышать на застроенной территории величины... 25 мм; 2) СКО определения высот пунктов (точек) съемочной геодезической сети относительно ближайших реперов (марок) опорной высотной сети не должны превышать в равнинной местности... 3,1 см при высоте сечения рельефа 0,25 м; 3) СКО взаимного положения на плане закоординированных точек и углов капитальных зданий, расположенных на расстоянии до 50 м один от другого, не должны превышать... 50 мм; 4) СКО съемки рельефа относительно ближайших точек геодезического обоснования при высоте сечения 0,25 м не должны превышать... 7,9 см — при углах наклона местности ν до 2°;... 10,4 см — при... ν от 2 до 10°».

В этой же работе отмечается, что «съемочное обоснование для топографической съемки застроенных территорий масштаба 1:200 может создаваться путем проложения теодолитных ходов при $m_N = 24''$ (m_N — СКО направления) и с повышенным требованием к точности измерения линий (m_L/L) = 1/8500,

которые обеспечиваются любым современным светодальномером или электронным тахеометром.

Для определения высот точек съемочного обоснования рекомендуется использовать техническое нивелирование.

1.3.8. Обновление топографических планов

С течением времени на местности происходят различного рода изменения, поэтому инженерно-топографические и кадастровые планы, созданные в графической, цифровой и других формах, необходимо обновлять для приведения их содержания в соответствие с существующим состоянием ситуации и рельефа местности.

На участках местности при изменении ситуации и рельефа более чем на 35%, топографические съемки должны производиться заново [4].

При обновлении топографических планов и банков инженерно-геодезических данных используют государственные фонды Роскартографии, государственные территориальные фонды, материалы инженерных изысканий Госстроя России и другие топографо-геодезические материалы (аэрофотоснимки, оригиналы и копии планов, профили и т. п.).

При обновлении планов в качестве съемочного обоснования используют пункты опорной геодезической сети, точки постоянного съемочного обоснования, четкие контуры, нивелирные знаки и твердые контуры, имеющие отметки.

Съемку новых объектов и изменений рельефа выполняют согласно требованиям к наземной топографической съемке следующими методами:

- *автоматизированный* — изображение на оригиналах с помощью графопостроителей и плоттеров по цифровой модели местности;
- *фотомеханический* — исправление прозрачной копии старого плана по аэрофотоснимкам, увеличенным до масштаба этого плана; монтаж мозаичного оригинала по фотокопиям с планов;
- *механический* — нанесение изображений на оригиналы с помощью пантографа по координатной сетке и опорным пунктам;
- *оптический* — перенесение изображений на оригиналах с помощью проекторов и других оптических приборов;
- *графический* — копирование с исходного материала на оригинал с помощью прозрачных основ или светового стола.

Средняя погрешность нанесения контуров не должна быть более 0,5 мм относительно их положения на исходных картографических материалах.

Глава 1.4. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1.4.1. Виды и задачи инженерных изысканий

Проектирование и строительство сооружений выполняют на основе инженерных изысканий, в результате которых изучают экономические и природные условия района строительства, прогнозируют взаимодействие строительных объектов с окружающей средой, обосновывают их инженерную защиту и безопасные условия жизни населения [2].

Изыскания делятся: 1) на предварительные на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) или технико-экономического расчета (ТЭР); 2) на стадии проекта; 3) на стадии рабочей документации. Кроме того, изыскания делят на экономические и технические. **Экономические изыскания** предшествуют техническим, определяют экономическую целесообразность строительства сооружения в данном месте с учетом обеспечения сырьем, строительными материалами, транспортом, энергией, рабочей силой и т. п. **Технические изыскания** дают сведения о природных условиях участка для их учета при проектировании и строительстве.

Основные изыскания, выполняемые на всех типах сооружений, включают: инженерно-геодезические; инженерно-геологические и гидрогеологические; гидрометеорологические, климатические, метеорологические, почвенно-геоботанические и др.

Инженерно-геодезические изыскания дают информацию о ситуации и рельефе местности и являются основой для проектирования и проведения других видов изысканий. Они состоят из работ по созданию геодезического обоснования и топографической съемке участка строительства, трассированию линейных сооружений, привязке геологических выработок, гидрологических створов и т. п.

Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания дают информацию о геологическом строении участка работ, прочности грунтов, подземных водах и т. п., позволяющую оценить условия строительства. Гидрометеорологические изыскания дают сведения о реках и водоемах, их глубинах, изменении уровней воды, уклонах, направлениях и скоростях течений, расходах воды и т. д.

При инженерных изысканиях выполняют также геотехнический контроль для оценки опасности и риска от природных и техногенных процессов, дают обоснование инженерной защиты территории, выполняют кадастровые и другие работы и исследования в процессе строительства, эксплуатации и ликвидации объектов.

Порядок, методика и точность инженерных изысканий изложены в строительных нормах и правилах, например в СНиПе 11-02-96 и СП 11-04-97.

1.4.2. Изыскания площадных сооружений

Состав инженерных изысканий зависит от размера сооружения. На небольших площадках выполняют инженерно-геодезические, инженерно-геологические, гидрометеорологические изыскания. Для больших площадных сооружений кроме перечисленных выполняют изыскания по инженерным сетям, транспорту, строительным материалам, почвенно-геоботаническим, санитарно-гигиеническим (для земельно-хозяйственного устройства, озеленения территории), т. е. выполняют все инженерные изыскания.

Площадку для строительства по возможности выбирают в малопересеченной, малопригодной для сельского хозяйства местности с благоприятными геологическими и гидрогеологическими условиями. Размеры, конфигурация и положение площадки должны соответствовать размерам проектируемого сооружения и коммуникаций с учетом их расширения, удобным соединением с железнодорожными и автодорожными магистралями и т. п.

Желательно, чтобы рельеф площадки был спокойным, с уклонами, обеспечивающими быстрый сток поверхностных вод, чтобы при вертикальной планировке с уклонами от 0,003...0,005 до 0,06...0,08 не возникало большого объема земляных работ. Грунты площадки должны выдерживать давление без устройства дорогостоящих фундаментов. Грунтовые воды должны быть ниже дна подвалов и галерей, паводковая вода не должна затоплять участок.

Выбор участка начинают в камеральных условиях, путем сравнения вариантов выбирают оптимальную площадку для полевого обследования, в процессе которого уточняют инженерно-геологические и гидрогеологические условия, подходы к железным и шоссейным дорогам, выпуски канализационных коллекторов, определяют примерные расходы по освоению площадки, согласовывают возможности отвода территории и решают другие вопросы.

Для создания проекта площадку и часть прилегающей территории снимают в масштабе 1:2000 с сечением рельефа через 1 м. Дополнительно по имеющимся топокартам составляют ситуационный план в масштабе 1:10 000–1:25 000, на который наносят контуры площадок промышленного предприятия, жилого поселка, водозаборных и очистных сооружений, реки, дороги, карьеры, месторождения строительных материалов, намечают подъездные пути и др.

В это же время производят крупномасштабную инженерно-геологическую съемку площадки. Для составления рабочих чертежей площадку под основные сооружения снимают в масштабе 1:5000–1:1000 с сечением рельефа через 0,5 м. На этой площадке выполняют детальные инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания.

На стадии изысканий под проект целесообразно выполнить аэрофотосъемку в масштабе 1:7000–1:10 000 для создания плана площадки в масштабе 1:2000 и карты района строительства в масштабе 1:10 000.

При изысканиях площадки на стадии рабочей документации основные сооружения, участок под жилой поселок, застроенные территории с густой сетью подземных коммуникаций снимают в масштабе 1:1000–1:500 методами геодезии, фотограмметрии, при слабом рельефе — нивелированием поверхности по квадратам со сторонами 20 и 30 м, при этом должны быть определены координаты углов капитальных зданий, узловые точки коммуникаций, получены отметки полов зданий, колодцев, бровок дорог и т. д.

1.4.3. Изыскания для линейных сооружений

При изысканиях для линейных сооружений определяют плановое и высотное положение *трассы* — продольной оси линейного сооружения, закрепленной на местности, топографическом плане, карте или на цифровой модели местности. Основные элементы трассы: план и продольный профиль. Трасса по возможности должна быть прямолинейной и не превышать допустимый уклон. На местности трассу приходится искривлять для обхода препятствий, участков с большими уклонами и неблагоприятных по геологическим и гидрогеологическим характеристикам. Следовательно, трасса состоит из прямых, соединенных между собой кривыми с различными радиусами. Продольный профиль трассы состоит из линий разных уклонов, связанных вертикальными кривыми. Некоторые трассы (электропередач и т. п.) являются пространственными ломаными линиями (кривые не проектируют).

Линейные сооружения имеют много общего, поэтому целесообразно на примере изысканий одного из них, например автомобильной дороги (АД), показать все этапы изысканий. Комплекс работ по выбору трассы с учетом предъявляемых требований называют *трассированием*. На начальном этапе выполняют камеральное трассирование на картах и по материалам специальной аэрофотосъемки. Полученную таким образом трассу переносят и закрепляют на местности, т. е. выполняют *полевое трассирование*.

Камеральное трассирование выполняют обычно на картах в масштабе 1:25 000, 1:50 000. Если трасса не помещается на одном листе карты, то сначала используют карту более мелкого масштаба, на которой вблизи прямой, соединяющей начало и конец трассы, выбирают опорные точки, через которые обязательно должна пройти дорога. Отрезки между опорными точками должны помещаться на карте более крупного масштаба, на которой и выполняют камеральное трассирование.

В равнинной местности при уклонах меньше допустимых выполняют «*свободное*» проектирование, при котором направление и положение дороги зависит только от естественных и искусственных препятствий.

В схолмленной и горной местности крутизна скатов превышает допустимые уклоны дороги, и в таких условиях трассу прокладывают «*напряженным ходом*», т. е. отыскивают такие ее направления, которые имеют предельно допустимый уклон. В результате получают извилистую трассу, которую на отдельных участках спрямляют, заменив ломаную линию на прямую. В горной местности для обеспечения допустимого уклона трассу прокладывают в виде серпантин и петель.

Кроме рельефа на выбор трассы влияют геологические, экологические и другие условия. Построив с учетом всех условий трассу на карте, определяют координаты углов поворота, наносят пикеты, рассчитывают сопрягающие кривые, составляют продольный профиль по отметкам, определенным по горизонталям.

Полевое трассирование начинают с рекогносцировки, при которой изучают состояние геодезической основы и полосы трассы. Затем переносят камеральный проект в натуру. В первую очередь методом полярных координат, линейных засечек и т. п. определяют и закрепляют на местности углы поворота трассы, используя для этого плановые геодезические сети и твердые контуры, имеющиеся на карте и местности вблизи углов поворота.

Следующий этап — **провешивание прямолинейных участков** между углами поворота трассы (вехи устанавливают через 100–150 м) и детальное обследование, в результате которого учитывают все особенности местности, по которой будет проходить дорога, и находят оптимальный вариант трассы.

Следует обратить внимание на долговременное закрепление углов поворота, чтобы они сохранились до начала строительства, кроме того, долговременными знаками закрепляют ряд других точек, таких как примыкание к существующим дорогам, места перехода через препятствие и др. На каждую закрепленную точку составляют абрис с указанием ее положения относительно долговременных местных предметов.

Следующий этап — **измерение углов поворота трассы и расстояний** между их вершинами. Углы поворота трассы θ, θ' (рис. 1.29) — горизонтальные углы между старыми и новыми направлениями трассы. θ — правый, а θ' — левый углы поворота, индексом i обозначают номер вершины. На рисунке 1.29, *а*

$$\theta_1 = 180° - \beta_1;\ \theta'_2 = 180° - \beta_2.$$

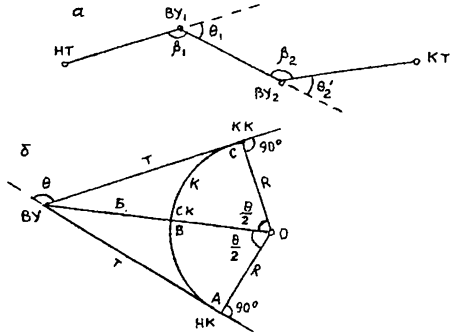


Рис. 1.29. Схема трассы линейного сооружения (*а*) и главные точки и элементы кривой (*б*)

Углы β_1, β_2 измеряют так же, как и в теодолитном ходе, средняя квадратическая ошибка измерения угла не должна превышать 0,5′.

Расстояния между вершинами трассы измеряют стальной мерной лентой или дальномером с относительной ошибкой 1:2000. Поправки за наклон линии вводят при углах наклона $\nu > 2°$. Трассу с измеренными расстояниями и углами и привязанную к пунктам геодезической основы называют **магистралью**, ее можно рассматривать как теодолитный ход, позволяющий определять дирекционные углы и координаты вершин.

При измерении сторон от начала магистрали откладывают отрезки длиной 100 м горизонтального проложения, концы отрезков закрепляют **пикетами** (колышек длиной 15–25 см забивают вровень с землей, рядом забивают сторожок длиной 40–50 см, выступающий над землей на 15–20 см, на сторожке подписывают номер пикетной точки, например ПК 15, это соответствует расстоянию 1500 м от начала магистрали).

Кроме пикетных точек на магистрали отмечают характерные точки рельефа, контуров и вершин углов поворота трассы, называемые плюсовыми, их положение определяют от ближайших предыдущих пикетов, например, точка ПК 15 + 17,0 расположена на расстоянии 17,0 м по магистрали от ПК 15. При углах наклона $\nu > 2°$ к отложенному расстоянию D прибавляют поправку

$$\Delta D = 2D\sin\frac{2v}{2}.$$

На поворотах трассы между прямолинейными участками разбивают сопрягающие кривые, чаще всего дуги окружностей. Радиус закругления зависит от категории дороги. Имеется пять категорий автомобильных дорог, радиусы закруглений для которых равны 1000, 600, 400, 250, 125 м соответственно.

На рисунке 1.29, б дуга окружности *ABC* с центром в точке 0 и радиусом *R* вписана в угол поворота трассы. Кривые и прямые касаются в точке *А* — начале кривой (*НК*) и в точке *С* — конце кривой (*КК*). Биссектриса *ОВ* угла пересекает кривую в точке *В* — середине кривой (*СК*). Точки *НК, СК, КК* называют *главными точками круговой кривой*. Расстояние от вершины угла до точки касания называют *тангенсом* (*Т*), расстояние *ABC* между точками касания по кривой называют длиной кривой (*К*) и расстояние от вершины угла до середины кривой называют *биссектрисой* (*Б*); разность Δ = 2Т – *К* называют *домером* (*D*). Значения *Т, К, Б, D* называют *главными элементами (параметрами) кривой*, их значения зависят от радиуса *R* и угла поворота θ. На рисунке 1.29, б

$$T = Rtg\left(\frac{\theta}{2}\right);$$

$$K = \pi R\left(\frac{\theta}{180^\circ}\right); \qquad (1.21)$$

$$Б = \frac{R}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} - R = R\left[\sec\left(\frac{\theta}{2}\right) - 1\right];$$

$$Д = 2T - K.$$

Пикетажное наименование главных точек кривой вычисляют по формулам

$$ПК(НК) = ПК(ВУ) - T; \qquad (1.22)$$
$$ПК(КК) = ПК(НК) + K;$$
$$ПК(СК) = ПК(НК) + K/2;$$

контроль:
$$ПК(КК) = ПК(ВУ) + T - Д;$$
$$ПК(СК) = ПК(КК) — К/2.$$

Вычисление пикетажных наименований главных точек кривой выполняют до сантиметров.

На местности при малых значениях тангенса для нахождения *НК* и *КК* от вершины угла по обе стороны по трассе откладывают тангенс кривой *Т*. *СК* находят, отложив от вершины угла по его биссектрисе величину *Б*. При больших тангенсах *НК* и *КК* находят, отложив от ближайших к ним пикетов расстояния, равные разностям пикетажа выносимой в натуру точки и ближайшего пикета. Например, если *ПК*(*НК*) = 7 + 24,17, то от *ПК*7 откладывают по трассе 24,17 м и получают положение *НК*.

Отложив от *ВУ* значение *Т*, получают *КК*. Зная пикетажное наименование *ПК*(*КК*), вычисленное по второй и четвертой формулам (1.22), положение следующего пикета находят, отложив от *КК* разность пикетажного наименования следующего пикета и *ПК*(*КК*). Например, *ПК*(*КК*) = 9 + 37,42 м. *ПК*10 получают, отложив от *КК* отрезок d' = 100,00 – 37,42 м = 62,58 м.

Для получения сведений о рельефе в поперечном трассе направлении строят **поперечные профили** длиной 15–30 м. На таких профилях вправо и влево от трассы намечают характерные точки рельефа, а при их отсутствии фиксируют точки через 5–10 м. Поперечные профили должны отражать особенности рельефа в полосе трассы; при углах наклона 10° и больше поперечные профили строят на каждом пикете и плюсовых точках. Все сведения о пикетаже отражают в пикетажном журнале.

На участках со сложными геологическими условиями, в местах перехода через препятствие, на площадках под строительство придорожных сооружений и т. п. создают планы в масштабе 1:500, 1:1000.

Следующим этапом изысканий является нивелирование трассы, которое в равнинной и всхолмленной местности выполняют методом геометрического нивелирования. При больших углах наклона используют тригонометрическое нивелирование.

Геометрическое нивелирование трассы выполняют независимо две бригады: первая нивелирует все точки трассы и реперы, а вторая — только километровые пикеты, временные и постоянные реперы. Кроме того, чтобы уравнять объемы работ, второй бригаде могут поручить нивелирование поперечников. На трассах до 50 км геометрическое нивелирование выполняет одна бригада, которая прокладывает прямой и обратный нивелирные ходы. В прямом ходе нивелируют все точки, а в обратном — только связующие точки, реперы, километровые пикеты.

Расхождение суммы превышений в прямом и обратном направлениях или ходах не должно превышать

$$f_h = (\Sigma h_{пр.} - \Sigma h_{обр.}) \le (50\sqrt{L}) \text{ мм},$$

где L — длина нивелирного хода, км.

Если нивелирный ход длиной до 16 км привязан с обеих сторон к опорным высотным пунктам, то повторное нивелирование можно не выполнять, при этом высоты всех точек определяют из одиночного хода, а значение

$$f_h = \Sigma h - (H_к - H_н) \le (70\sqrt{L}) \text{ мм}.$$

Последовательность перемещения нивелира и реек в одиночном, нивелирном ходе показана на рисунке 1.30. Начинают ход с репера (РП68). Отсче-

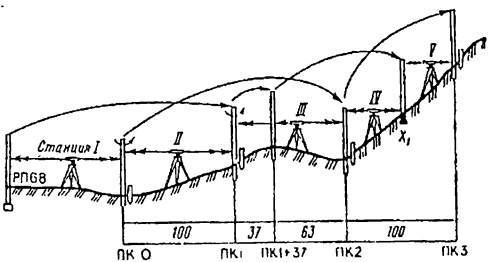


Рис. 1.30. Схема геометрического нивелирования трассы

ты по рейкам выполняют по схеме $З_ч - П_ч - П_к - З_к$ (отсчеты по задней $З$ и передней $П$ рейкам, индекс «ч» означает черную сторону рейки, а «к» — красную). Отсчеты записывают в нивелирный журнал. Превышения $h_ч = З_ч - П_ч$, $h_к = З_к - П_к$ не должны отличаться более чем на 10 мм. При выдерживании допуска определяют среднее превышение. При использовании односторонней рейки нивелирование выполняют при двух горизонтах нивелира. В качестве связующих точек обычно используют пикеты.

При крутых склонах расстояние от нивелира до рейки приходится сокращать, и в качестве связующих точек используют *иксовые точки*, они не имеют пикетажного обозначения, не участвуют при построении профиля трассы. Точки трассы между связующими точками называют промежуточными, отсчет

по рейке на промежуточных точках берут по черной стороне или при одном горизонте прибора после взятия отсчетов по рейкам на связующих точках. Точки на поперечниках нивелируют как промежуточные.

Камеральная обработка полевых материалов

Камеральную обработку начинают с проверки полевых журналов. Затем составляют *ведомости прямых и кривых*, при этом выполняют следующие условия [19].

1. Сумма $\sum P$ прямолинейных участков плюс сумма $\sum K$ длин всех кривых должна равняться длине трассы [$ПК(КТ) - ПК(НТ)$], т. е. разности пикетажных значений ее конца и начала. Кроме того, $\sum P + \sum K = \sum L - \sum Д$, где $\sum L$ — сумма расстояний между углами поворота, $\sum Д$ — сумма домеров.

2. $2\sum T - \sum K = \sum Д$, где $\sum T$ – сумма тангенсов.

3. Разность суммы правых и левых углов поворота должна равняться разности дирекционных углов конечной и начальной сторон трассы, т. е. $\sum\theta - \sum\theta' = \alpha_к - \alpha_н$.

По данным ведомости прямых и кривых составляют план трассы в масштабе 1:2000–1:10000. Вместо дирекционных углов и длин сторон для нанесения трассы на план можно использовать координаты углов поворота. Масштаб плана зависит от длины трассы и сложности ситуации в ее полосе. На плане отмечают углы поворота трассы, пикетные и плюсовые точки, главные точки круговых кривых и др. Подписывают длину и ориентировку прямых участков трассы, параметры круговых кривых и пикетаж главных точек. Условными знаками для планов данного масштаба изображают ситуацию в полосе трассы.

Высоты точек трассы вычисляют в нивелирном журнале. Выполняют **постраничный контроль**: на каждой странице журнала определяют $\sum З$ на заднюю рейку, $\sum П$ — на переднюю рейку, $\sum h$ — средних превышений. При правильных вычислениях на данной странице

$$0{,}5(\sum З - \sum П) = \sum h.$$

Постраничный контроль подтверждает правильность только вычислений превышений между связующими точками и не выявляет ошибок отсчетов, установки реек, некачественного прибора и т. п.

Невязку f_h нивелирного хода определяют по полученной ранее формуле

$$f_h = \sum h_{изм} - \sum h_{теор.} = \sum h_{изм.} - (H_к - H_н).$$

Допустимое значение невязки

$$доп. f_h = (70\sqrt{L})\ мм,$$

где L — длина хода, км.

Если невязка допустима, то ее распределяют с обратным знаком поровну на все средние превышения. Поправки определяют до целых миллиметров, поэтому в некоторые превышения вносят поправку, несколько большую (обычно на 1 мм) ее значения

$$v = -\frac{f_h}{N},$$

где N — число станций, при этом $\sum v = -f_h$. После этого по исправленным превышениям последовательно, начиная с репера или марки, определяют отметки связующих точек по формулам

$$H_1 = H_{Pn} + h_1,$$
$$H_2 = H_1 + h_2,$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$H_n = H_{n-1} + h_n.$$

Высоты H_i промежуточных точек и точек на поперечниках находят по формуле

$$H_i = ГП - a_i,$$

где

$$ГП = H_A + a = H_B + b,$$

a, b — отсчеты по рейкам, поставленным на точки A и B с известными отметками H_A и H_B; a_i — отсчет по рейке, установленной на промежуточной точке i.

Продольный профиль (рис. 1.31) автодороги составляют на миллиметровой бумаге в горизонтальном масштабе 1:2000–1:10 000, вертикальный масштаб обычно в 10 раз крупнее горизонтального. Графическое построение профиля дополняют различными данными, которые размещают в отдельных графах, в совокупности называемых *сеткой профиля*. Построение продольного профиля автодороги начинают с граф 6 и 7: в графе 7 по пикетажному журналу согласно принятому горизонтальному масштабу фиксируют все пикетные и плюсовые точки; в графе 6 — их отметки из нивелирного журнала (черные отметки), округленные до 0,01 м. В графе 3 повторяют графу 7, в графе 2 составляют план трассы, составленный в принятом горизонтальном масштабе по результатам съемки, закрепленным в пикетажном журнале. В середине этой графы прямой линией показывают ось дороги, стрелками в соответствующих местах отмечают повороты трассы. Результаты геологических исследований грунтов отмечают в графе 1. Верхняя линия этой графы является условным горизонтом, от этой линии по восстановленным к ней перпендикулярам, называемым *ординатами*, откладывают в вертикальном масштабе разно-

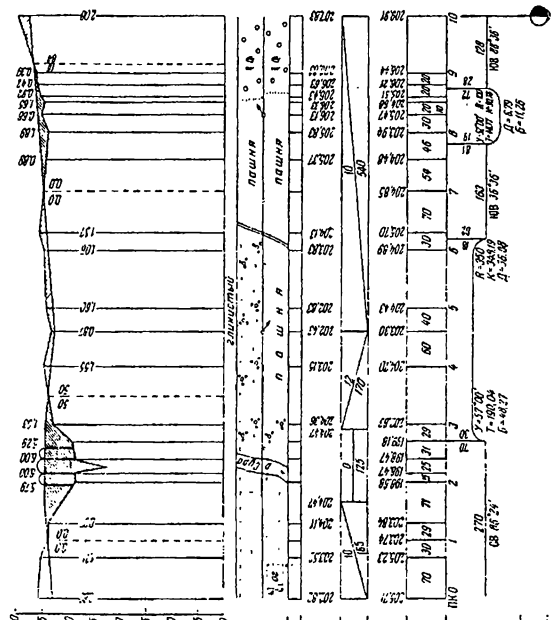


Рис. 1.31. Продольный профиль

сти черная отметка минус условный горизонт. Ординаты точек профиля не должны быть более 10–15 см. Полученные на ординатах точки соединяют ломаной линией, являющейся профилем трассы.

В графе 8 изображают прямые участки дороги и дугами — закругления, выпуклость дуги вверх означает поворот дороги вправо, а вниз — влево. Из конечных точек дуг опускают перпендикуляры на линии пикетажа, их положения должны соответствовать пикетажным наименованиям начала и конца кривой. У перпендикуляров подписывают расстояния до ближайших пикетов. Внутри каждой кривой выписывают ее элементы. На прямых участках трассы подписывают их длины и румбы. В графе 9 кружками диаметром 5 мм изображают километровые указатели. Правую половину кружков заливают тушью. Из центра кружка опускают перпендикуляр на линию пикетажа.

В графах 4 и 5 отмечают проектные уклоны и отметки. Профиль вычерчивают тушью: ось дороги в графе 2, графы 4, 5, 8, 9 и все надписи в них — красным цветом, остальные графы и надписи — черным цветом.

Профили поперечников вычерчивают в одном масштабе, равном вертикальному масштабу продольного профиля.

На продольный профиль наносят проектную (красную) линию. Проектную (красную) отметку H_i определяют по формуле

$$H_i = H_{i-1} + s_1 i,$$

где H_{i-1} — отметка точки $(i - 1)$, i – уклон, s_i — горизонтальное проложение отрезка $(i - 1) - i$. Уклон i не должен превышать предельного значения. Кроме того, проектная линия должна проходить через фиксированные точки, например точки примыкания к существующим сооружениям, установленные расчетами отметки мостовых переходов, отстояния оси дороги от проводов высоковольтных линий и т. п. Красные отметки, округленные до 0,01 м, пишут в графе 4 сетки профиля на продолжениях соответствующих ординат. На горизонтальных участках, $i = 0$, красные отметки подписывают только в начале и конце участка.

В графе 5 проводят диагонали, показывающие направление уклона, вблизи диагонали в виде дроби подписывают уклон [в промиллях (‰) — тысячных долях $i = \text{tg}\nu$, 1‰ = 0,1%] и длину проектной линии на данном участке. Разность между красной и черной отметками точек на одной ординате называют рабочей отметкой, которая показывает высоту насыпи или глубину выемки, их подписывают на соответствующих ординатах выше проектной линии при насыпи и ниже — при выемке.

Пересечение линии профиля и проектной линии происходит **в точке нулевых работ**. Для выноса этой точки в натуру вычисляют расстояние x до нее от ближайшего пикета. На рисунке 1.32 из подобия треугольников имеем

$$\frac{x}{s-x}=\frac{y_2}{y_1},$$

откуда

$$x=\frac{y_2 s}{y_1+y_2}.$$

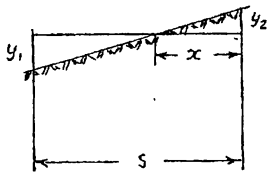


Рис. 1.32. К определению точки нулевых работ

Расстояния от точки нулевых работ в целых метрах подписывают по обе стороны от ординаты этой точки, прочерченной пунктиром синим цветом (см. рис. 1.31).

1.4.4. Детальная разбивка закруглений. Вынос пикетов на кривую

Кроме главных точек кривой ее обозначают рядом точек, расположенных обычно через равные промежутки κ = 20 м при $R \geq 500$, 10 м при R = (500 – 100) м, 5 м при $R < 100$ м. Детальную разбивку закруглений можно выполнить различными способами. Рассмотрим некоторые из них.

Способ прямоугольных координат связан с определением на круговой кривой радиуса R точек κ_1, κ_2, κ_3,... через равные дуги s. Примем касательную к кривой в точке A за ось абсцисс, а линию AO, перпендикулярную ей, за ось ординат. На рисунке 1.33 имеем

$$\frac{\varphi}{s}=\frac{360^\circ}{2\pi R},$$

откуда

$$\varphi=\frac{s}{R}\times\frac{180^\circ}{\pi}. \qquad (1.24)$$

Значения

$$x_1=R\sin\varphi,\quad y_1=R-R\cos\varphi=R(1-\cos\varphi)=2R\sin^2\frac{\varphi}{2};$$

$$x_2=R\sin 2\varphi,\quad y_2=R-R\cos 2\varphi=R(1-\cos 2\varphi)=2R\sin^2\varphi; \qquad (1.25)$$

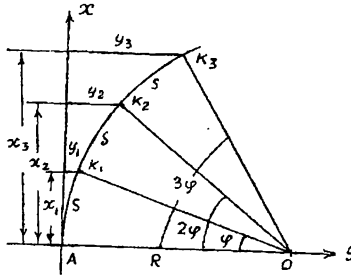


Рис. 1.33. Способ прямоугольных координат

На местности для определения точек K_1, K_2,... от точки А по направлению абсциссы откладывают x_1, x_2,... и по перпендикулярам к абсциссе откладывают ординаты y_1, y_2,... Разбивку кривой ведут от начала кривой (*НК*) и конца кривой (*КК*) к середине. В этом способе положение точек K_1, K_2,... получают независимо друг от друга, поэтому ошибки не возрастают при переходе от одной точки к другой, что является достоинством способа.

В таблицах часто вместо абсцисс дают разность «кривая без абсциссы». В этом случае от точки *А* откладывают по оси абсцисс длину кривой и отступают назад на величину «кривая без абсциссы», т.е. в итоге получают значение x_1,... Способ прямоугольных координат целесообразно использовать на открытой ровной местности.

Вынос пикета на кривую. Положим, что начало кривой имеет пикетажное наименование $ПК(НК) = ПКN + s_1$. При радиусе закругления R по формулам (1.24), (1.25) находим

$$\varphi_1 = \frac{s_1}{R} \times \frac{180^\circ}{\pi}; \quad x_1 = R\sin\varphi; \quad y_1 = 2R\sin^2\frac{\varphi}{2}.$$

Отложив значения x_1, y_2, находим положение $ПКN + s_1$ на кривой.

Способ углов, или полярный способ, заключается в том, что из точки А (рис. 1.34) на окружности через равные дуги s между касательной и секущей имеем углы, равные половине центрального угла φ. На рисунке 1.34 хорда

$$d = 2R\sin\frac{\varphi}{2}.$$

откуда

$$\sin\frac{\varphi}{2}=\frac{d}{2R}. \qquad (1.26)$$

Установив в точке A теодолит, совмещают нуль лимба с нулем алидады, визируют на точку M и от направления AM вращением алидады откладывают угол $\frac{\varphi}{2}$. Отложив по направлению визирного луча отрезок d, получают точку B кривой. Затем вращением алидады откладывают угол φ. Совместив начало ленты (рулетки) с точкой B и отложив на ленте отрезок d, поворачивают ее до совпадения конца отрезка d с визирным лучом и получают точку C и т. д. Недостаток способа — рост ошибок по мере увеличения числа точек на кривой. Способ используют при разбивке кривых на насыпи или выемке и когда способ координат неудобен.

Способ продолженных хорд (рис. 1.35). Точку B на кривой определяют линейной засечкой из точек A и B', откладывая из точки A лентой хорду d и рулеткой из точки B' отрезок y. Точку B' определяют путем откладывания по оси абсцисс хорды d. По направлению AB (продолжение хорды) откладывают хорду d и получают точку C'. Отложив от точки B хорду d и от C' отрезок κ *линейной засечкой получают точку* C и т. д. Из подобных треугольников OBC и $BC'C$ имеем

$$\frac{\kappa}{d}=\frac{d}{R},$$

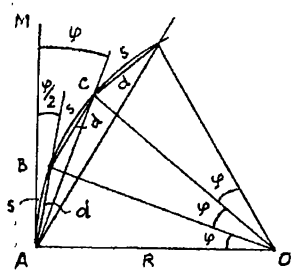


Рис. 1.34. Способ углов

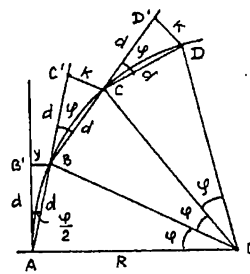


Рис. 1.35. Способ продолженных хорд

откуда

$$\kappa = \frac{d^2}{R}.$$

Так как в треугольнике $AB'B$ угол $B'AB$ равен $\varphi/2$, то можно считать $y = \kappa/2$.

Этот способ применяют в местах, где нельзя использовать метод прямоугольных координат. Следует заметить, что первую точку B на кривой можно определить методом прямоугольных координат, для чего нужно знать угол φ, который можно определить по формуле (1.26).

1.4.5. Переходные кривые

Переходные кривые позволяют от прямолинейных участков с радиусом, равным бесконечности, постепенно, плавно переходить к круговым кривым с радиусом R. Из различных кривых (кубическая парабола, лемниската и др.) наиболее удобной считают *клотоиду (радиоиду)*, которая близка к кривой, описываемой движущимся автомобилем на дорожных закруглениях.

Клотоидные кривые определяются уравнением

$$\rho = A^2/s,$$

где s — расстояние по клотоиде от ее начала до определяемой точки; A — параметр клотоиды, ρ — ее радиус кривизны. При $s = 0$ $\rho = \infty$, с ростом s ρ уменьшается и при $\rho = R$, где R — радиус круговой кривой, длина клотоиды $s = L = A^2/R$.

Положение точек клотоиды можно определить способом прямоугольных координат, используя зависимости [21]

$$x_n = L_n - \frac{L_n^5}{40A^4}; \quad y_n = \frac{L_n^3}{6A^2} - \frac{L_n^4}{33A^6}. \tag{1.27}$$

Длину участка клотоиды L_n определяют по формуле

$$L_n = nl_\kappa,$$

где n — число интервалов разбивки (порядковый номер точки).

Для нахождения точки на кривой по касательной клотоиды от ее начала откладывают значение x_n, а по перпендикуляру к касательной — y_n.

Для выноса пикета на клотоиду при его расстоянии от начала клотоиды $L_{n\kappa}$ по формуле (1.27) определяют $x_{n\kappa}$, $y_{n\kappa}$ и по их значениям выносят пикет на клотоиду.

1.4.6. Проектирование трассы трубопроводов

Скорость движения жидкости в трубе не должна быть большой (большая скорость жидкости может привести к разрушению, размыву трубы) и не слишком малой, когда возможно заиление из-за выпадения в осадок ила, песка и т. д. В металлических трубах скорость жидкости допускается до 8 м/с, в керамических — в два раза меньше. Минимальная скорость колеблется в пределах 0,7–1,5 м/с и не зависит от материала трубы. Минимальный продольный угол самотечного трубопровода должен быть не менее 0,7% для труб малого диаметра и 0,5% — для труб большого диаметра и коллекторов.

Глубина заложения трубопровода должна быть такой, чтобы избавить его от чрезмерного давления или вибрации от различных источников на поверхности земли, в первую очередь транспорта, и не допускать промерзания трубопровода. При этом необходимо учитывать подключение к трубопроводу обслуживаемых объектов. Безнапорные канализационные сети должны располагаться на безопасном расстоянии от других коммуникаций, чтобы ремонтные или профилактические работы на одной из них не выводили из строя соседние.

Проект трассы должен быть оптимальным с технической и экономической точек зрения: объем извлеченного из выемок грунта должен равняться его объему, уложенному в насыпи, глубина закладки трубопровода должна быть минимально допустимой, при этом необходимо учитывать условия эксплуатации сооружения.

Трассу трубопровода проектируют с учетом продольного профиля местности. Особое внимание уделяют размещению смотровых колодцев, их размещают в местах присоединения новых труб, в точках изменения уклона и направления трассы, между колодцами трубопровод должен быть строго прямолинейным. Построение профиля трубопровода начинают с нанесения смотровых колодцев, горизонтальных расстояний. Отметку лотка первого колодца определяют с учетом подключения к проектируемой магистрали обслуживаемых ею объектов. Уклоны должны соответствовать нормальной работе системы и минимуму затрат на ее сооружение. На равнинной местности достаточно иметь минимально допустимый уклон, чтобы не заглублять магистраль и не увеличивать глубину смотровых колодцев. На рельефных участках назначают максимальные уклоны и сооружают перепадные колодцы.

Отметку H_{j+1} лотка следующего колодца определяют по формуле

$$H_{j+1} = H_j + i_n d,$$

где H_j — отметка лотка предыдущего соседнего колодца, i_n — проектный уклон трубы, d — горизонтальное расстояние между колодцами.

На рисунке 1.36 приведен профиль самотечного канализационного трубопровода, на который наносят данные о пересекаемых им препятствиях, приводят сведения о характере грунтов, уровне подземных вод, результаты гидравлических расчетов.

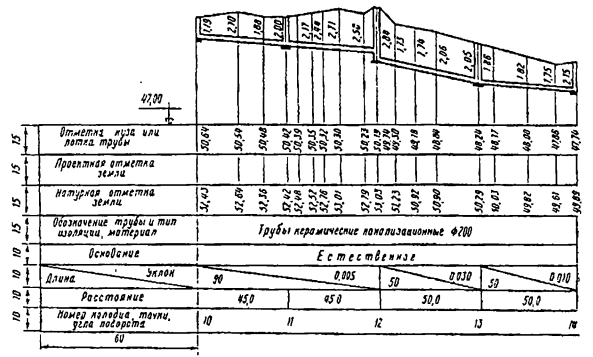


Рис. 1.36. Профиль самотечного канализационного трубопровода

При строительстве напорных трубопроводов их размещают обычно параллельно земной поверхности, при этом пикетаж на продольном профиле рассчитывают не по горизонтали, а по поверхности земли. Напорные трубопроводы большого диаметра из-за технической сложности изгиба труб прокладывают без соблюдения параллельности земной поверхности, пикетаж в этом случае считают по горизонтали.

1.4.7. Вертикальная планировка. Определение объемов земляных работ

Для размещения инженерного сооружения искусственно изменяют рельеф, приводят его в положение, удобное для строительства и эксплуатации возводимого объекта. Связанные с этим работы называют *вертикальной планировкой*, ее стараются выполнять так, чтобы максимально сохранить есте-

ственный рельеф и не нарушить сложившуюся геологическую структуру, не вызвав такие явления, как просадка грунта, оползни, заболачивание и т. п.

Преобразование рельефа связано с перемещением грунта для создания выемок, котлованов, насыпей, дамб и др. Возникают также работы по инженерной подготовке территории к строительству: устройство дренажа, подпорных стенок, укрепление откосов и т. п.

Проект вертикальной планировки создают на крупномасштабных топографических планах участка работ. Физическую поверхность земли при этом называют *фактической*, или «*черной*» поверхностью. Горизонтали и отметки, изображающие рельеф физической поверхности, также называют фактическими, или «черными». В результате создания проекта получают *проектную*, или «*красную*», поверхность. Отметки и горизонтали этой поверхности называют проектными (красными).

Создание проектной поверхности связано с перемещением земляных масс. Величины срезки (выемки) и подсыпки (насыпи) определяют *рабочими отметками*. Насыпи соответствуют положительные рабочие отметки, а выемке — отрицательные. Совокупность точек, для которых рабочие отметки равны нулю, называют *линией нулевых работ*, она является границей участков с положительными и отрицательными рабочими отметками. Разность объемов насыпей и выемок называют *балансом земляных работ*. При проектировании стремятся, чтобы баланс земляных работ был *нулевым*. Это условие обычно согласуется с условием *минимума земляных работ*.

Оформляющими (планирующими) поверхностями могут быть плоскости, криволинейные поверхности и их сочетания. При вертикальной планировке, как правило, определяют *объем земляных работ*, т. е. вычисляют объем грунта в выемках и насыпях. Для более точного определения трудозатрат при вертикальной планировке находят центры тяжести перемещения грунта и расстояния, на которые он должен быть перемещен. Сведения об объемах насыпей и выемок и оптимальных путях перемещения грунта из выемок в насыпи показывают на *картограммах земляных работ*.

Определение объема котлована

Котлован необходим для сооружения фундамента и подземной части сооружения. В проекте устанавливают размеры и расположение сооружения, ширину a и длину b дна котлована (a и b несколько больше соответствующих размеров сооружения) (рис. 1.37). Крутизну откоса котлована, дамб, траншей и т. п. определяют уклоном i, равным отношению превышения к горизонтальному проложению, т. е. $i = h/d = \operatorname{tg}\nu$. Кроме того, для этой цели используют *коэффициент откоса* $m = d/h = 1/i = \operatorname{ctg}\nu$, ν — угол наклона.

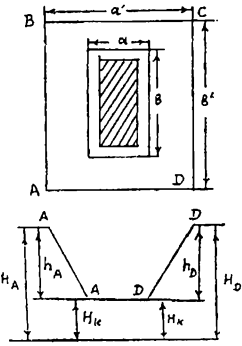


Рис. 1.37. Определение объема котлована

Объем котлована для небольших сооружений определяют по приближенной формуле

$$v = \frac{P_K + P'_K}{2} h_K, \qquad (1.28)$$

где $P_K = ab$ — площадь дна котлована, $P'_K = a'b'$ — площадь котлована на уровне физической поверхности, h_K — средняя глубина котлована, определяемая по формуле

$$h_K = h_A + h_B + h_C + h_D)/4 = [(H_K - H_A) +$$

$$+ (H_K - H_B)] + (H_K - H_C) + (H_K - H_D)]/4 =$$

$$= H_K - 0{,}25\,(H_A + H_B + H_C + H_D),$$

где H_K — отметка дна котлована; H_A, H_B, H_C, H_D — высоты углов котлована на уровне физической поверхности земли.

Для больших котлованов и при повышенной точности определения объема котлован делят на части, каждая из которых близка к геометрической фигуре, определяют объемы этих фигур, сумма полученных объемов равна объему котлована. Из-за значительных неровностей земной поверхности на участке работ иногда возникает необходимость строить вертикальные сечения котлована и использовать их для более точного определения объема котлована.

Определение объема траншеи

В траншеи укладывают коммуникации. Глубина h траншеи определяется проектом, ширина дна траншеи обычно на 0,4 м больше ширины укладываемой в нее коммуникации. Крутизна бортов траншеи зависит от устойчивости грунта и определяется коэффициентом откоса m. При определении объема выносимой земли траншею в зависимости от сложности рельефа делят на участки длиной l = 50 – 100 м. На границах этих участков строят поперечные профили (сечения) (рис. 1.38).

Отметки H^n дна траншеи определяют по продольному профилю трассы. Площади P_A и P_B поперечных сечений в точках A и B определяют по формулам

$$P_A = 0{,}5h_A(b_A + b'_A);$$

$$P_B = 0{,}5h_B(b_B + b'_B).$$

Учитывая

$$b' = b + 2\frac{b'-b}{2} = b + 2hm,$$

находим

$$P_A = h_A(b_A + h_A m);$$

$$P_B = h_B(b_B + h_B m).$$

Объем V_{AB} траншеи на участке (блоке) AB определяют по формуле

$$V_{AB} = \frac{1}{2}(P_A + P_B)AB. \quad (1.29)$$

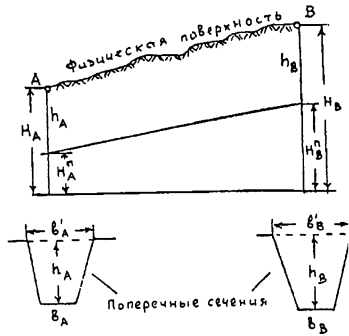


Рис. 1.38. Определение объема траншеи

Для определения объема траншеи с более высокой точностью целесообразно иметь сечения P_A, P_j,..., P_B через более, короткие расстояния l. В этом случае элемент объема

$$dV = Pdl,$$

а

$$V = \int_{lo}^{ln} Pdl. \quad (1.30)$$

Интегрирование можно выполнить численным методом, используя те или другие формулы численного интегрирования. Если узлы интегрирования располагаются произвольно, т. е. используют сечения в наиболее характерных местах, и расстояния между этими сечениями неодинаковы, то для численного интегрирования можно использовать формулы:
трапеций

$$\int_{xo}^{xn} ydx = \frac{1}{2}\left[\begin{array}{c} y_0(x_1 - x_0) + y_1(x_2 - x_0) + y_2(x_3 - x_1) + \ldots + \\ + y_{n-1}(x_n - x_{n-2}) + y_n(x_n - x_{n-1}) \end{array}\right] \quad (1.31)$$

или парабол (n — четное)

$$\int_{xo}^{xn} y dx = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{h/2}(x_{2i} - x_{2i-2})(A_i y_{2i-2} + B_i y_{2i-1} + C_i y_{2i}), \qquad (1.32)$$

где

$$A_i = 2 - Q; \quad B_i = 2 + Q_i + 1/Q; \quad C_i = 2 - 1/Q; \quad Q_i = \frac{x_{2i} - x_{2i-1}}{x_{2i} - x_{2i-2}};$$

$$A_i + B_i + C_i = 6.$$

В формуле (1.32) $i = n/2$ — число пар интервалов между узлами интегрирования.

Используя формулу (1.31), вместо (1.30), находим

$$V = \frac{1}{2}\left[\begin{array}{c} P_0(l_1 - l_0) + P_1(l_2 - l_0) + P_2(l_3 - l_1) + \ldots + \\ + P_{n-1}(l_n - l_{b-2}) + P_n(l_n - l_{n-1}) \end{array}\right], \qquad (1.33)$$

где l_i — расстояние от начальной точки до точки i, l_0 — расстояние от начальной точки до начала трассы (траншеи); P_i — площадь сечения в точке i.

При использовании формулы (1.32) парабол имеем

$$V = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{n/2}(l_{2i} - l_{2i-2})(A_i P_{2i-2} + B_i P_{2i-1} + C_i P_{2i}), \qquad (1.34)$$

где

$$A_i = 2 - Q; \quad B_i = 2 + Q_i + 1/Q; \quad C_i = 2 - 1/Q; \quad Q = \frac{l_{2i} - l_{2i-1}}{l_{2i-1} - l_{2i-2}},$$

$$A_i + B_i + C_i = 6.$$

При одинаковом расстоянии между сечениями трассы $Q_i = 1$, $A_i = C_i = 1$, $B_i = 4$, т. е. формулы (1.32), (1.34) будут совпадать с известной формулой Симпсона.

Пример. Определить объем траншеи, если площади сечений $P_0 = 4{,}65$ м^2, $P_1 = 4{,}17$ м^2, $P_2 = 4{,}87$ м^2, $P_3 = 5{,}84$ м^2, $P_4 = 3{,}95$ м^2, $l_0 = 0$, $l_1 = 5{,}19$ м, $l_2 = 9{,}13$ м, $l_3 = 11{,}17$ м, $l_4 = 19{,}55$ м.

По приближенной формуле (1.29) имеем:

$$V_1 = 0{,}5\,(P_0 + P_4)l_4 = 0{,}5\,(4{,}65 + 3{,}95)\,19{,}55 = 84{,}1 \text{ м}^3.$$

По формуле (1.33) находим:

$$V_2 = 0{,}5\,[4.65 \cdot 5{,}19 + 4{,}17 \cdot 9{,}13 + 4{,}87\,(11{,}17 - 5{,}19) +$$

$$+ 5{,}84\,(19{,}55 - 9{,}13) + 3{,}95\,(19{,}55 - 11{,}17)] = 92{,}6 \text{ м}^3.$$

По формулам (1.34) получаем:

$$Q_1 = \frac{l_2 - l_1}{l_1 - l_0} = \frac{9{,}13 - 5{,}19}{5{,}19 - 0} = 0{,}7592;$$

$$Q_2 = \frac{l_4 - l_3}{l_3 - l_2} = \frac{19{,}55 - 11{,}17}{11{,}17 - 9{,}13} = 4{,}1078;$$

$A_1 = 1{,}2408$; $B_1 = 4{,}0764$; $C_1 = 0{,}6828$; $A_1 + B_1 + C_1 = 6{,}0000$.

$A_2 = -2{,}1078$; $B_2 = 6{,}3513$; $C_2 = 1{,}7566$; $A_2 + B_2 + C_2 = 6{,}0001$.

$$V_3 = \frac{1}{6}\,[(9{,}13 - 0)\,(1{,}2408 \cdot 4{,}65 + 4{,}0764 \cdot 4{,}17 +$$

$$+ 0{,}6828 \cdot 4{,}87) + (19{,}55 - 9{,}13)\,(-2{,}1078 \cdot 4{,}87 +$$

$$+ 6{,}3513 \cdot 5{,}84 + 1{,}7566 \cdot 3{,}95)] = 98{,}3\ \text{м}^3.$$

Для оценки точности полученного по формуле парабол результата используют приближенную формулу

$$\Delta = \frac{J_{\text{I}} - J_{\text{II}}}{15},$$

где J_{I}, J_{II} — значения интеграла, полученного при шаге интегрирования q и $2q$ соответственно. В рассматриваемом примере $J_{\text{I}} = V_3 = 98{,}3$ м^3, при удвоенном шаге интегрирования имеем

$$Q = \frac{l_4 - l_2}{l_2 - l_0} = \frac{19{,}55 - 9{,}13}{9{,}13 - 0} = 1{,}1413;\ \text{A} = 0{,}8587;\ \text{B} = 4{,}0175;$$

$$\text{C} = 1{,}1238;\ \text{A} + \text{B} + \text{C} = 6{,}0000.$$

$$J_{\text{II}} = V_3 = \frac{1}{6}\,[(19{,}55 - 0)\,(0{,}8587 \cdot 4{,}65 + 4{,}0175 \cdot 4{,}87 +$$

$$+ 1{,}1238 \cdot 3{,}95)] = 91{,}2\ \text{м}^3.\ \ \Delta = \frac{98{,}3 - 91{,}2}{15} = 0{,}47\ \text{м}^3,$$

что составляет 0,5% от величины V. Поэтому значение V_3, полученное по формуле парабол, можно считать достаточно точным.

Расхождение между значениями $V_1 - V_3 = -14{,}2$ м^3, что составляет 15,65% от 0,5 $(V_1 + V_3)$; разность $V_2 - V_3 = -5{,}7$ м^3, что составляет 6,0% от 0,5 $(V_2 + V_3)$.

Следовательно, более точное значение V_3, определяемое по формуле парабол (с ошибкой около 0,5%), можно получить при тех же исходных данных, что и по формуле трапеций. Поэтому для более точного определения объема траншеи целесообразно использовать формулу (1.34), вычисляя площади сечений траншеи в наиболее характерных точках.

Рассмотренные методы можно использовать для вычисления объемов выемок при строительстве каналов, автомобильных и железных дорог. При сложной конструкции земляного полотна и изменчивости рельефа местности для определения площади сечения используют графическое построение сечения, эффективно для этой цели используют компьютеры.

Для определения объема грунта в дамбе можно использовать формулы, применяемые для определения объема траншеи.

1.4.8. Геодезические разбивочные работы

На площадке будущего строительства в подготовительный период выполняют комплекс работ по созданию плановой и высотной геодезической основы, т. е. закрепленных на местности точек с известными плановыми координатами и высотами, они будут служить исходными пунктами для перенесения проекта сооружения в натуру и для выполнения исполнительной съемки.

Следующим этапом являются *геодезические разбивки* (или просто разбивки) — комплекс камеральных и полевых работ для определения на местности с требуемой точностью пространственного положения точек, осей, плоскостей возводимого сооружения согласно рабочим чертежам проекта. По графическому, аналитическому или графо-аналитическому проекту сооружения путем разбивочных работ этот проект переносят на местность (в натуру).

Разбивку сооружений выполняют в три этапа. На первом этапе выполняют основные разбивочные работы. От пунктов геодезической основы по данным привязки на местности определяют положение главных или основных разбивочных осей и закрепляют их.

На втором этапе, начиная с возведения фундамента, выполняют детальную разбивку сооружений: от закрепленных точек главных и основных осей выносят продольные и поперечные оси отдельных строительных элементов сооружения, определяют уровень проектных высот.

Третий этап связан с разбивкой технологических осей оборудования. Главные оси, определяющие общее положение сооружения и его ориентировку (первый этап), могут быть определены со средней квадратической ошибкой 3–5 см, а иногда и грубее, детальная разбивка (второй этап) выполня-

ется со средней квадратической ошибкой 2–3 мм и точнее, а разбивку технологических осей (третий этап) выполняют с точностью до миллиметра и десятых долей миллиметра.

1.4.9. Вынос в натуру проектных углов и длин линий

Разбивочные работы сводятся к нахождению на местности точек, определяющих геометрию сооружения. Плановое положение точек можно определить полярным методом, т.е. путем построения на местности относительно исходной стороны проектного направления (угла) и отложения по нему проектного расстояния от исходного пункта.

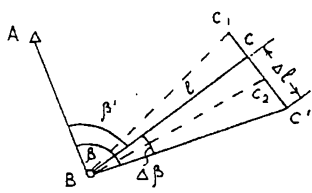


Рис. 1.39. Построение проектного угла

Проектный угол строят относительно известного направления *BA* (рис. 1.39) и известной вершины угла *B*. Теодолит устанавливают над точкой *B*, приводят его в рабочее положение, т. е. центрируют, нивелируют и т. д. Перекрестие нитей зрительной трубы наводят на точку *A* и берут отсчет по горизонтальному кругу, к этому отсчету прибавляют проектный угол β и, открепив алидаду, устанавливают вычисленный отсчет, при этом визирная ось трубы указывает направление BC_1, на местности фиксируют точку C_1. Выполнив аналогичные действия при другом круге, получают точку C_2. Из положений точек C_1, C_2 определяют среднее, т. е. точку *C*, и полученный угол ABC принимают за проектный.

Для построения проектного угла с повышенной точностью угол ABC измеряют несколькими приемами и определяют его более точное значение β′. Число *n* приемов можно определить, исходя из следующих соображений. Так как $\beta' = (\beta_1 + + \beta_2 + \ldots + \beta_n)/n$, то, используя формулу средней квадратической ошибки функции при $m_{\beta_1} = m_{\beta_2} = \ldots = m_{\beta_n} = m_\beta$, находим

$$\left(m'_\beta\right)^2 = \left(m^2_{\beta_1} + m^2_{\beta_2} + \ldots + m^2_{\beta_n} + \right)/n^2 = \frac{nm^2_\beta +}{n^2} = \frac{m^2_\beta}{n},$$

откуда

$$n = \frac{m^2_\beta}{\left(m'_\beta\right)^2}, \qquad (1.35)$$

где m_β — номинальная для данного теодолита средняя квадратическая ошибка измерения угла; m'_β — требуемая средняя квадратическая ошибка построения угла. Так, для построения угла с $m'_\beta = 5''$ теодолитом 2Т15 ($m_\beta = 15''$) его нужно измерить $n = (15/5)^2 = 9$ приемами.

Определив β', находят поправку

$$\Delta\beta = \beta - \beta',$$

которую используют для уточнения построения угла. На рисунке 1.39 отрезок

$$\Delta l = l\frac{\Delta\beta}{\rho}, \qquad (1.36)$$

который при положительном значении откладывают от точки C вправо (если смотреть по линии BC) в перпендикулярном BC направлении и получают точку C'. При отрицательном значении Δl его откладывают влево от точки C. Угол ABC' равен проектному углу β с заданной точностью. Для контроля угол ABC' измеряют. Если измеренное значение отличается от проектного β на допустимую величину, то измерения заканчивают. В противном случае выполняют дополнительные измерения для уточнения результата.

Средняя квадратическая ошибка откладывания отрезка

$$m_{\Delta l} = l\frac{m_{\Delta\beta}}{\rho}. \qquad (1.37)$$

При l = 150 м, $m\Delta\beta = 2''$ имеем $m_{\Delta l}$ = 150 000 мм · 2″/206 265″ = 1,5 мм. С такой точностью Δl можно отложить рулеткой или линейкой с миллиметровыми делениями.

Для **выноса в натуру проектной линии** (отрезка) $l_{пр.}$ необходимо от исходной точки в заданном направлении отложить расстояние, горизонтальное проложение которого равно проектной величине. При этом поправки за наклон линии, компарирование, температуру вводят непосредственно в процессе построения отрезка, что затрудняет работу, особенно при ее высокой точности. Поэтому, как и при построении угла в способе редукции, от исходной точки A (рис. 1.40) откладывают приближенное расстояние и закрепляют точку B'.

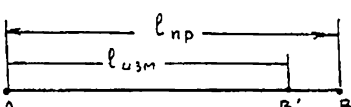


Рис. 1.40. Вынос в натуру проектного отрезка

Расстояние AB' с необходимой точностью измеряют компарированными мерными приборами или дальномерами с учетом всех поправок, в итоге получают $l_{изм}$. Поправку $\Delta l = l_{пр.} - l_{изм.}$ откладывают с соответствующим знаком от точки B'. Для контроля отрезок AB измеряют и сравнивают полученное значение с проектным.

1.4.10. Вынос в натуру проектных отметок, линий и плоскостей

Отметки в проекте сооружения дают от уровня «чистого пола» или условного уровня, поэтому предварительно их перевычисляют в систему высот исходных реперов. Для **выноса в натуру точки с проектной отметкой** $H_{пр.}$ нивелир устанавливают примерно посередине между точкой и репером с отметкой $H_{Рп}$.

На репере и выносимой точке устанавливают рейки (рис. 1.41). По отсчету a на установленной на репере рейке и отметке $H_{Рп}$ репера определяют горизонт прибора

$$ГП = H_{Рп} + a.$$

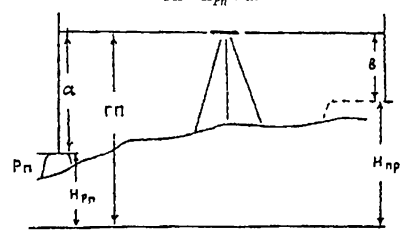


Рис. 1.41. Вынос в натуру проектной отметки

Для контроля $ГП$ целесообразно получить по другому исходному реперу. На рисунке 1.38 на определяемой точке отсчет

$$b = ГП - H_{пр.} = H_{Рп} + a - H_{пр.} \qquad (1.38)$$

Рейку на проектной точке поднимают или опускают до тех пор, пока отсчет по средней нити зрительной трубы нивелира не будет равен b, в этот

момент пятка рейки будет совпадать с проектной высотой. Ее отмечают, забивая колышек, проводя черту на строительной конструкции, и т. п. Для контроля выполняют нивелирование, определяют фактическую отметку выносимой точки и сравнивают ее с проектной. При недопустимых расхождениях работу повторяют.

Для выноса отметок нескольких точек, находящихся на одной вертикальной плоскости (на стене или колонне), на ней отмечают проекцию визирной оси, т. е. отмечают *ГП* – горизонт прибора. От этой линии откладывают вверх или вниз соответственно значения b_i и отмечают проектные отметки точек.

Точность выноса проектной отметки согласно формуле с учетом m_ϕ ошибки фиксирования при $m_a = m_b$.

$$m_{пр.}^2 = m_{Pn}^2 + m_a^2 + m_b^2 + m_\phi^2 = m_{Pn}^2 + 2m_a^2 + m_0^2. \qquad (1.39)$$

Разбивка на местности линии заданного уклона

Для построения линий проектных уклонов применяют нивелиры, теодолиты, лазерные приборы. Линии заданного уклона с помощью нивелира и реек выполняют двумя способами: горизонтальным лучом визирования и лучом, параллельным выносимой в натуру линии.

Способ горизонтального луча используют обычно при выносе на местности небольшого числа точек. Точка A^n закреплена (рис. 1.42, а) и находится на проектной высоте H_A^n. По заданному направлению откладывают расстояния d и отмечают на местности точки 1, 2,..., n, которые следует затем установить на линии, проходящей через A_n, с заданным уклоном i. Нивелир устанавливают вблизи середины отрезка A^nB^n и приводят в рабочее положение, берут отсчет a_A по рейке в точке A^n. Затем рейку перемещают в точку 1 и устанавливают ее, перемещая вверх-вниз, чтобы отсчет по рейке

$$a_1 = a_A - id.$$

Положение уровня пятки рейки фиксируют колышком 1. Аналогичным образом определяют точки 2, 3,..., для которых $a_2 = a_A - 2id$, $a_3 = a_A - 3id$ и т. д. Для точки $B^n a_B = a_A - iD$.

Если точка A^n не вынесена на проектную линию, то рейку устанавливают на ближайшую точку с известной высотой H_{Pn}, берут отсчет а и определяют $ГП = H_{Pn} + \alpha$, отсчеты по рейке на точках *A*, 1, 2,.., *B* вычисляют по формулам

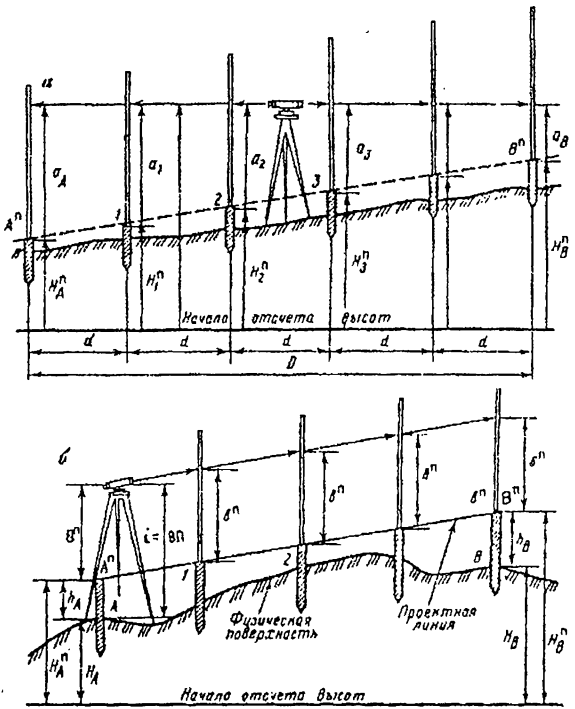


Рис. 1.42. Схемы разбивки линий заданного уклона

$a_A = ГП - H_A^n$; $\alpha_1 = ГП - H_1^n$; ..., $a_B = ГП - H_B^n$, где H_A^n, H_1^n, ..., H_B^n – проектные отметки выносимых в натуру точек, при этом отметка H_A^n должна быть задана, а отметки других точек находят с учетом уклона i и расстояния d, т. е. $H_1^n = H_A^n + id$; ..., $H_B^n = H_A^n + iD$.

При большом числе выносимых в натуру точек и при неодинаковом расстоянии между ними разбивку линии заданного уклона выполняют **наклонным визирным лучом.** Точки A^n и B^n должны находиться в проектном положении, на высотах H_A^n, H_B^n. Если расстояние AB не превышает 100–150 м, то нивелир устанавливают у одной из крайних точек, например у точки A (рис. 1.42, б), так, чтобы один подъемный винт был направлен в точку B. Измеряют высоту прибора $i = ВП$ и находят отсчет $b^n = i - \left(H_A^n - H_A\right)$. Наводят на рейку в точке B и вращением элевационного или подъемного винта устанавливают отсчет b^n по рейке, при этом визирная ось устанавливается параллельно линии A^nB^n, и во всех точках при отсчете b^n по рейке уровень пятки рейки будет совпадать с линией заданного уклона. В точках 1, 2,... забивают колышки так, чтобы по установленным на них рейкам был отсчет b^n.

При использовании теодолита его устанавливают над начальной точкой с проектной отметкой и измеряют высоту прибора. На вертикальном круге с учетом места нуля устанавливают отсчет, соответствующий проектному уклону, т. е. $v = \text{arc tg } i$, например, при $i = 0{,}02$ имеем $v = \text{arc tg } 0{,}02 = 1°08'45''$. Отметив на рейке или вехе высоту прибора, выполняют те же действия, что и при использовании нивелира.

Вынос в натуру проектной плоскости

Для разбивки в натуре проектной плоскости можно использовать следующие методы [21].

1. Применение нивелира с горизонтальной визирной плоскостью

В этом случае определяют проектные отметки расположенных на плоскости точек по проектному $i_{пр}$ продольному и i_{non} поперечному уклонам проектной плоскости и по продольному $d_{пр}$ и поперечному d_{non}, горизонтальным проложениям (рис. 1.43). Проектную отметку точки E (и любой другой точки) можно определить по формуле

$$H_E^n = H_A^n + i_{пр} \cdot d_{пр} + i_{non} \cdot d_{non}.$$

Знак уклона положителен, если отметка точки B больше отметки точки A, и отрицателен, если $H_A > H_B$. Определив H_E^n, далее работу выполняют так же, как при выносе в натуру проектных отметок, т. е. вычисляют отсчет

$$b = H_A^{\text{п}} + \alpha - H_E^{\text{п}}$$

по рейке, установленной в точке E, при этом уровень пятки рейки дает положение проектной отметки на данной проектной плоскости. Таким способом получают проектные отметки необходимого числа точек на проектной плоскости.

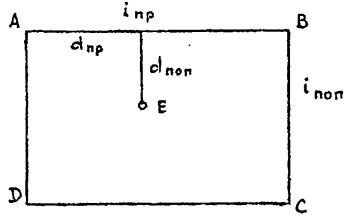


Рис. 1.43. Вынос в натуру проектной плоскости

2. Использование нивелира с наклонной визирной плоскостью

Нивелир устанавливают так, чтобы его визирная плоскость была параллельна заданной проектной плоскости. Предварительно обычным методом выносят на местности не менее четырех основных точек проектной плоскости *ABCD* (рис. 1.43), определяющих направление его продольных и поперечных уклонов. Нивелир устанавливают так, чтобы два его подъемных винта были направлены по линии *AB*, а третий — по направлению *AD*. Установив рейки на две точки с известными проектными отметками, дающими направление продольного уклона, вращением двух подъемных винтов, параллельных линии продольного уклона, методом приближений добиваются одинаковых отсчетов по этим рейкам.

Затем выставляют еще одну рейку на третью точку, дающую с одной из первых двух направление поперечного уклона, и, вращая третий подъемный винт, добиваются на последних двух рейках одинакового отсчета. Убедившись, что отсчеты на все три точки одинаковы, для контроля берут отсчет на четвертую точку. Если отсчет b_n на эту точку будет такой же, как и на предыдущие, то установка нивелира окончена, и получившийся отсчет b_n записывают в журнал разбивки. На разбиваемой площадке устанавливают необходимое количество колышков. На каждый из них устанавливают рейку и колышек забивают до тех пор, пока отсчет по рейке не будет равен b_n.

1.4.11. Передача отметок на стронтельные горизонты

Для передачи проектных отметок точек в котловане или на верхних этажах здания опорные точки необходимо иметь на этих же горизонтах. Для этой цели устанавливают временный репер, например *B* (рис. 1.44), его

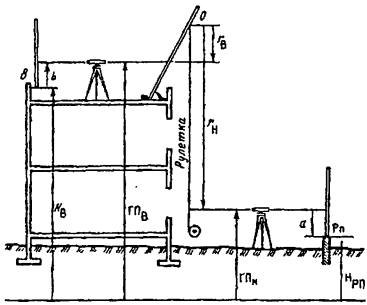


Рис. 1.44. Схема передачи отметки на этажи здания

отметку определяют от репера, расположенного на поверхности земли вблизи возводимого объекта. Рулетку подвешивают в вертикальном положении, ее нижний конец, для гашения раскачивания, погружают в емкость с вязкой жидкостью (маслом или водой, смешанной с опилками). Посередине между репером и зданием устанавливают нивелир на нижнем горизонте и берут отсчеты: a — по рейке, установленной на репере, $r_н$ — по шкале рулетки. Нивелир переносят на верхний горизонт и берут отсчеты r_b — по шкале рулетки и b — по нивелирной рейке, поставленной на временный репер B, отметку которого вычисляют по формуле (см. рис. 1.44).

$$H_в = H_{Рп} + a + r_н - r_b - b. \tag{1.40}$$

Для контроля на верхнем и нижнем горизонтах при других высотах прибора делают отсчеты и повторно определяют

$$H'_B = H_{рп} + a' + r'_H - r'_b - b'.$$

Разность $H_B - H'_B$ не должна превышать 6 мм.

Аналогичным способом определяют отметку временного репера в котловане, в этом случае

$$H_в = H_{Рп} + a - r_н + r_b - b, \tag{1.41}$$

т. е. изменяются знаки при $r_н$ и r_b.

1.4.12. Геодезические работы на строительной площадке

Графический, аналитический или графо-аналитический проект сооружения необходимо перенести в натуру, т. е. закрепить на местности точки, линии, плоскости, отмеченные в проекте. Как уже отмечалось, работа выполня-

ется в три этапа. Сначала от пунктов геодезической основы выносят на местность и закрепляют контур сооружения, этот этап называют *основными разбивочными работами*.

Следующий этап — *детальная разбивка*, при которой определяют на местности отдельные конструктивные элементы и части сооружения в плане и по высоте. Исходными при детальной разбивке являются точки и линии контура объекта, полученные при основных разбивочных работах. Основное внимание уделяется высокой точности определения взаимного положения элементов сооружения. После закладки фундамента выполняют разбивки, связанные с монтажом строительных конструкций и технологического оборудования, при этом необходимо отметить высокую точность планового и высотного положения конструкций.

После выполнения очередного этапа строительно-монтажных работ выполняют контрольную исполнительную съемку, результаты которой являются основным документом при сдаче готового объекта заказчику или передаче его другой организации для продолжения строительства. Кроме того, выполняют исполнительную съемку в масштабе 1:500 или 1:1000 всей территории строительства. Съемку подземных коммуникаций выполняют в процессе строительства в открытых траншеях. По результатам исполнительной съемки составляют исполнительный генеральный план объекта.

Для определения деформаций возводимого сооружения предусматривают специальные геодезические наблюдения, которые должны выполняться с начала строительства и продолжаться несколько лет до стабилизации объекта наблюдений. Циклы измерений с высокой точностью выполняют через определенные промежутки времени. Если результаты таких наблюдений соответствуют расчетным, то это свидетельствует о высоком качестве проекта и его реализации в отношении оснований и конструкции фундамента. В противном случае результаты измерений позволяют установить причину деформаций и принять меры к их устранению, а позже убедиться в эффективности принятых мер.

Проектная документация

Возведение любого сооружения выполняют по проекту, в который входят различные графические и текстовые документы. Основным является генеральный план (генплан), который составляют в масштабе 1:500–1:2000 на топографической основе (топографическом плане) того же масштаба. На генплане показывают все проектируемые проезды, здания и сооружения с указанием их назначения. Генплан сложных объектов дополняют специальным чертежом, на котором отмечают геодезические пункты на строительной площадке,

координаты и высоты важнейших точек проекта, определенных в результате аналитической подготовки проекта.

На основании этих документов составляют **разбивочные чертежи**, необходимые для перенесения в натуру основных осей сооружения. На разбивочных чертежах фиксируют горизонтальные углы и расстояния, необходимые для перенесения на местность точек, линий, плоскостей.

Детальную разбивку сооружений выполняют по **рабочим чертежам**, на которых даны крупномасштабные планы и профили всех частей сооружения, включая планы фундаментов, с обозначением строительных осей и расстояний между ними. Строительные оси делят на продольные и поперечные. На рисунке 1.45 строительные оси показаны тонкими линиями. Продольные оси обозначают заглавными буквами русского алфавита, а поперечные — арабскими цифрами. Строительные оси делят на главные, основные и промежуточные. *Главными* называют оси, которые делят сооружение на симметричные части (на рис. 1.45 это оси Б и 3).

Основные (крайние) оси дают общий контур сооружения (оси А, В, 1, 5). Все остальные оси, находящиеся между основными, называют *промежуточными*, или *внутренними*. Расстояния между осями должны учитывать использование в процессе возведения, ремонта и реконструкции унифицированных строительных конструкций и подъемно-транспортных механизмов, поэтому при составлении проекта расстояния между строительными осями назначают кратным модулю M. Величина основного модуля равна 100 мм. Кроме основного используют укрупненные модули: $3M$ = 300 мм, $10M$ = 1000 мм, $50M$ = 5000 мм.

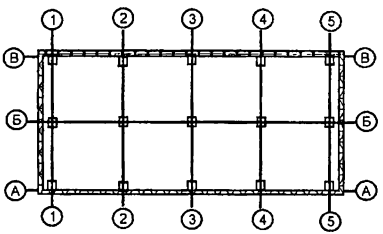


Рис. 1.45. Схема строительных осей

Размещение строительных осей относительно конструктивных элементов здания называют *привязкой строительных осей*, которую задают расстоянием от строительной оси до грани или оси элемента конструкции. Кроме отмеченной документации используют ряд других документов. Геодезические работы на строительной площадке выполняют на

основе проекта производства геодезических работ (ППГР), который является частью проекта производства строительства (ППС). При составлении ППГР учитывают календарные графики строительства, разработанные в проекте организации строительства (ПОС).

Точность разбивок и строительные допуски

На первом этапе при разбивке основных осей сооружения допустимые ошибки обычно определяют по формуле

$$\Delta_{осн.} = \Delta M,$$

где Δ — ошибка определения на плане координат точки или длины линии; M — знаменатель масштаба плана. При $\Delta = 0{,}2$ мм для генплана в масштабе 1:1000 имеем $\Delta_{осн.} = 0{,}2$ м. Значение $\Delta_{осн.}$ характеризует допустимую ошибку разбивки только одной точки сооружения. Положение остальных точек сооружения относительно друг друга определяют в соответствии с допусками на детальную разбивку.

Точность детальной разбивки сооружения зависит от характера здания и устанавливается, строительными нормами и правилами (СНиП). Наиболее высокая точность требуется при разбивке для монтажа металлических конструкций (средние квадратические ошибки построения углов — 10″, расстояний — 1:15000, высот — 1 мм). Эти же параметры при возведении многоэтажных кирпичных и монолитных железобетонных зданий — 30″, 1:2000, 5 мм. Земляные сооружения разбивают с ошибками 60″, 1:500 и 50 мм соответственно.

Следует заметить, что номинальные значения какой-либо проектной величины не являются абсолютно точными, их задают наименьшим l_{min} и наибольшим l_{max} значениями, что соответствует верхнему $\delta^{в}$ и нижнему $\delta^{н}$ предельным отклонениям от номинала l_0:

Разность $\Delta = \delta^{в} - \delta^{н}$ называют *проектным допуском*. Отклонения элементов сооружения от проектного не одинаково изменяют функциональные (эксплуатационные) свойства объекта. Поэтому вводят понятие *функциональных допусков*, каждый из которых характеризует нарушение проектного положения рассматриваемого элемента конструкции. Основными из них являются: отклонение от прямолинейности (изгиб); зазор между примыкающими элементами; величина несоосности смежных элементов; отклонение оси элемента от горизонтали или вертикали и др.

Отмеченные погрешности установки строительных конструкций в проектное положение зависят от ошибок: изготовления конструкций; геодезической

разбивки; отклонений установки конструкции от данных разбивки и т. п. Для устранения ошибок разбивки на качество монтажа объекта допуск на ошибки геодезических разбивок принят в четыре раза меньше общего строительного допуска. Средние квадратические ошибки геодезических работ при строительстве зданий и сооружений различной сложности приведены в действующих строительных нормах и правилах (СНиП 11-02-96) и сводах правил по инженерным изысканиям для строительства (СНиП 11-104-97).

Если ошибки установки конструкции в проектное положение имеют систематический характер (например, размеры однотипных конструкций отличаются от номинальных), то при продвижении монтажных работ эта ошибка, накапливаясь, может превысить установленный допуск. Для исключения этого явления проектировщики должны предусмотреть компенсацию этой ошибки, например путем увеличения опорных площадок, на которые устанавливают строительные конструкции.

Ошибка Δ_i вынесенной на местность величины

$$\Delta_i = l_i - l_o,$$

где l_i, l_o — фактическое и проектное значения откладываемой величины. Значение Δ_i определяют при специальных контрольных геодезических измерениях. Величина допустимой ошибки разбивки в ряде случаев зависит от ее направления. Так, при разбивке сооружений их смещение по линии застройки не так заметно, как по перпендикуляру к линии фасадов.

1.4.13. Геодезическая сеть на строительной площадке

Пункты геодезической сети на строительной площадке используют для перенесения на местность основных осей сооружения, поэтому их называют пунктами *разбивочной геодезической основы*, которые при необходимости используют для построения локальных разбивочных сетей отдельных зданий и сооружений. После завершения строительства эти пункты являются основой крупномасштабных исполнительных съемок подготовленных к сдаче объектов. Иногда их можно использовать в качестве геодезической основы при наблюдении за осадками и деформациями возведенных зданий и сооружений. Пункты геодезического обоснования для изыскательских работ обычно не используют в качестве разбивочной основы, так как они не отвечают требованиям к разбивочной геодезической сети по точности, плотности и положению пунктов.

Проект геодезической разбивочной основы составляют согласно генеральному плану, чтобы при размещении пунктов геодезической сети учесть положение существующих и проектируемых сооружений, дорог, коммуни-

каций и т. п. Точность угловых, линейных измерений и превышений зависит от характера строительства и согласно требованиям СНиП 3.01.03-84 приведена в таблице 11 [19].

Таблица 11

Характеристика объекта строительства	Величина средней квадратической погрешности построения разбивочной сети строительной площадки		
	угловые измерения, с	линейные измерения	определение превышения на 1 км хода, мм
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью более 1 км^2; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. м^2	3	1/25 000	4
Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 км^2; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. м^2	5	1/10 000	6
Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. м^2; дороги, инженерные сети в пределах застраиваемых территорий	10	1/5000	10
Дороги, инженерные сети вне застраиваемых территорий; земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	10	1/2000	10

При составлении проекта геодезической основы на строительной площадке предусматривают ее привязку к пунктам государственной геодезической сети.

В жилищном и гражданском строительстве на местности закрепляют **красные линии**, координаты вершин которых обычно определяют путем прокладывания полигонометрических ходов с привязкой к городским и государственным сетям, а высоты — геометрическим нивелированием. В промышленном строительстве геодезической основой является **строительная сетка**, образующая при пересечении квадраты или прямоугольники со сторонами 50, 100, 200 м.

Вершины квадратов или прямоугольников закрепляют специальными долговременными центрами. Линии строительной сетки строят параллельно осям основных проездов и сооружений так, чтобы обеспечить сохранность боль-

шинства пунктов путем размещения их вне зоны земляных работ. Координаты вершин сетки определяют в общегосударственной системе и в системе строительной сетки, в последнем случае оси абсцисс и ординат параллельны линиям сетки, а начало координат совмещают с юго-западным углом сетки. Линии сетки нумерует через 100 м.

Выбор способа создания разбивочной основы зависит от размеров участка, особенностей местности, характера строительства и требуемой точности.

1.4.14. Вертикальное проектирование точек

При решении многих задач инженерной геодезии используют приборы вертикального проектирования (ПВП), что связано с увеличением этажности массовой застройки, созданием уникальных объектов ядерной энергетики, специальных технологических линий и т. п. При этом возрастают требования к точности инженерно-геодезических работ, усложняются условия измерений. Приборы вертикального проектирования позволяют более эффективно передавать плановые координаты выше и ниже исходной точки, контролировать вертикальность сооружений и т. п.

ПВП обычно делят на **механические** и **оптические**. В механических приборах отвесная линия реализуется струной с грузом или стержнем. В прямом отвесе струна устанавливается в вертикальное положение подвешенным грузом, помещенным в жидкость (масло, воду с опилками и др.). В обратном отвесе нижний конец струны (проволоки) закрепляют, а верхний натягивают динамометром, в вертикальное положение струна устанавливается при помощи двух взаимно перпендикулярных уровней. Прикрепленный к верхнему концу проволоки плавающий в жидкости поплавок также удерживает проволоку в отвесном положении. Точность механических центриров зависит от их конструкции, способа фиксации отсчета и высоты проектирования.

Наибольшее распространение получили **оптические** центриры, которые по точности делят на технические, точные и высокоточные. Технические центриры обычно встроены в теодолиты, тахеометры и др., их точность 1:5000–1:10 000 при расстоянии 10–20 м. Точные и высокоточные центриры являются самостоятельными приборами, по способу установки визирной оси в отвесное положение их делят на **уроненные** и центриры **с компенсатором**. Относительная ошибка проектирования точки точными центрирами равна 1:30 000–1:50 000 при расстоянии до 150 м. Компенсаторы в точных центрирах позволяют устанавливать визирную ось с точностью 1″.

Высокоточные центриры позволяют устанавливать визирную ось в отвесное положение с ошибкой менее 1″, имеют зрительную трубу с увеличением

30–40$^{\times}$ и позволяют выполнять проектирование с относительной ошибкой 1:100 000 при расстоянии 250–500 м.

При строительстве инженерных сооружений и монтаже технологического оборудования широко используют точные и высокоточные геодезические центриры. Кроме того, оптическое проектирование можно выполнить способом отвесных плоскостей, в котором вертикальную линию получают путем пересечения двух примерно взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостей, полученных теодолитами.

В СССР изготавливали оптические центриры ЦО-1, «Зенит ОЦП», «Надир ОЦП», которые позволяют выполнять центрирование с относительной ошибкой 1:100 000 при расстоянии до 250 м. Прецизионный оптический центрир PZL (б. ГДР) по своему назначению и области применения соответствует отечественному центриру ОЦП. PZL создан на базе нивелира Ni-007 с компенсатором, имеет в подставке оптический центрир для установки над точкой, горизонтальный круг с ценой деления 10′. Проектирование точек по вертикали выполняют по специальной палетке при установках лимба 0, 90, 180 и 270°. Корпус цилиндрической формы имеет входное отверстие в его верхней части. Лучи от предмета через объектив попадают на прямоугольную призму, подвешенную на нитях в виде маятника, которая является компенсатором угла наклона оси вращения прибора. Затем лучи через дополнительную призму направляются в окуляр, изображение предметов — прямое. Колебания маятника гасятся воздушным демпфером.

Горизонтирование PZL выполняют по круглому уровню, точная установка визирной оси зрительной трубы в отвесное положение выполняется автоматически с помощью компенсатора.

Построение отвесной линии ПВП выполняют следующим образом. ПВП устанавливают над проектируемой точкой на исходном горизонте. Над этой точкой в плитах перекрытий всех этажей оставляют небольшие отверстия. В отверстии верхнего перекрытия укрепляют наклеенную на оргстекло палетку (сетку взаимно перпендикулярных линий через 5 мм размером не менее 100 × 100 мм). ПВП устанавливают так, чтобы нить сетки зрительной трубы была параллельна линиям палетки, берут отсчет x' по шкале X палетки. Поворачивают прибор на 180°, берут отсчет x'' и вычисляют среднее значение $x = 0{,}5\,/x' + x''/$, аналогичным образом находят $y = 0{,}5\,/y' + y''/$. Эти измерения составляют один прием. Для повышения точности выполняют от двух до пяти приемов. В результате находят $x_{ср}$, $y_{ср}$, которые и откладывают на палетке и находят вертикальную проекцию исходной точки.

1.4.15. Способы разбивочных работ

Выбор способа получения на местности планового положения точек зависит от вида геодезической сети на строительной площадке, особенностей местности и возводимого сооружения и других причин. Реализация того или иного способа заключается в основном в построении на местности заданных углов и расстояний. Для контроля положения вынесенной на местности точки ее координаты определяют другим независимым способом. Полевые разбивочные и контрольные работы выполняют по разбивочным чертежам, составленным по специальным расчетам, в которых исходными служат координаты опорных и проектных точек.

1. Способ прямоугольных координат

Этот способ обычно применяют в случаях, когда геодезической основой является строительная сетка (рис. 1.46), ее вершины A, B, C, D закреплены на местности. Для выноса точки K (точка сооружения) по линии AD откладывают отрезок $d_1 = y_K - y_A$ и по перпендикулярному AD направлению отрезок $d_2 = x_K - x_A$. Для построения отрезков d_1 и d_2 теодолит устанавливают над точкой A и приводят его в рабочее положение. Перекрестие нитей зрительной трубы наводят на точку D и от точки A в створе линии AD, фиксируемой теодолитом, откладывают горизонтальное проложение d_1 и получают точку P. Теодолит переносят и устанавливают над точкой P, приводят его в рабочее положение, откладывают прямой угол APP'. По направлению PP' от точки P откладывают горизонтальное проложение d_2, получают точку K, закрепляют ее.

Средняя квадратическая ошибка положения точки K выражается формулой [2]

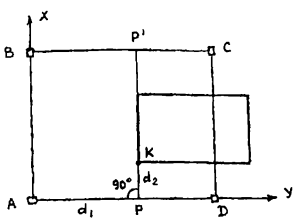


Рис. 1.46. Способ прямоугольных координат

$$m_K^2 = m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta y}^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \Delta x^2 + \\ + m_{ucx}^2 + m_u^2 + m_\phi^2, \qquad (1.42)$$

где $m_{\Delta x}$, $m_{\Delta y}$ — средние квадратические ошибки откладывания приращения координат; m_β — средняя квадратическая ошибка построения угла в точке P; m_{ucx}^2, m_u^2, m_ϕ^2 — средние квадратические ошибки исходных данных, центрирования теодолита и

фиксации точки К соответственно. Центрирование теодолита и фиксирование точки обычно равны $m_ц = m_ф = 1$ мм. При стороне строительной сетки 200 м и положении точки K в середине квадрата ($\Delta x = \Delta y = 100$ м) и при относительной ошибке откладывания Δx и Δy 1:10 000 получим $m_{\Delta x} = m_{\Delta y} = 100\,000/10\,000 = 10$ мм. При $m_\beta = 10'' \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right) \Delta x = 10'' \cdot 100\,000/206\,265'' = 5$ мм, $m_ф = 1$ мм.

Принимая $m_{исх} = 10$ мм, по формуле (1.42) находим

$$m_к = \sqrt{10^2 + 10^2 + 5^2 + 10^2 + 1^2 + 1^2} = 18 \text{ мм}.$$

Значения $m_ц$ и $m_ф$ по малости можно не учитывать.

2. Способ полярных координат

Этот способ широко применяется при разбивке зданий, сооружений и конструкций с пунктов полигонометрических и теодолитных ходов при малом расстоянии между исходными и выносимыми пунктами. Положение точки K на местности определяют путем откладывания от твердой линии AB угла β и по полученному направлению AK горизонтального проложения d. Угол $\beta = \alpha_A - \alpha_{AK}$, где α_A, α_{AK} — дирекционные углы линий AB и AK соответственно. Горизонтальное проложение d определяют по формулам

$$d = \sqrt{(x_K - x_A)^2 + (y_K - y_A)^2} = \Delta x \cos\alpha + \Delta y \sin\alpha.$$

Для контроля (рис. 1.47) положение точки K можно получить от опорной точки B, отложив от твердой линии BA угол β' и по полученному направлению горизонтальное проложение d'.

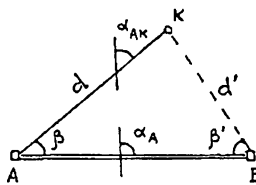


Рис. 1.47. Способ полярных координат

Средняя квадратическая ошибка выноса на местность точки K определяется формулой

$$m_к = \sqrt{m_{исх}^2 + m_ц^2 + m_ф^2 + m_d^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 d^2}.$$

При $m_ц = m_ф = 1$ мм, $m_d/d = 1/5000$, $d = 100$ м, $m_{исх} = 10$ мм,

$$m_\beta = 10'', m_d = \left(\frac{m_d}{d}\right)d = 100\,000/5000 = 20 \text{ мм}$$

имеем

$$m_к = \sqrt{10^2 + 1^2 + 1^2 + 20^2 + (10''/205265'')^2 100\,000^2} = 23 \text{ мм}.$$

Из приведенных расчетов видно, что уменьшение ошибки в положении точки K возможно при существенном уменьшении ошибки откладывания проектного горизонтального проложения.

3. Способ прямой угловой засечки

В этом способе положение проектной точки K (рис. 1.48) определяют путем откладывания в опорных точках A и B от опорной линии AB проектных углов β_1 и β_2. Базисом b является сторона разбивочной сетки или его измеренное значение. Проектные углы β_1 и β_2 вычисляют как разность дирекционных углов сторон, которые определяют из решения обратной геодезической задачи на плоскости по проектным координатам исходных пунктов и определяемой точки.

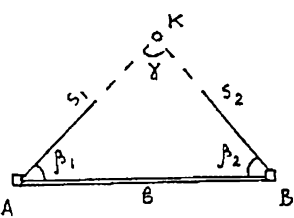


Рис. 1.48. Способ прямой угловой засечки

Точность разбивки рассматриваемым способом зависит от ошибки самой засечки, исходных данных, центрирования теодолита и визирной цели, фиксации определяемой точки. Значение

$$m_к^2 = m_з^2 + m_{исх}^2 + m_ц^2 + m_ф^2. \quad (1.43)$$

Средняя квадратическая ошибка

$$m_з = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}.$$

Значение

$$m_x = \frac{m_\beta}{\rho \sin\gamma}\sqrt{s_1^2 \cos^2\alpha_2 + s_2^2 \cos^2\alpha_1}; \quad (1.44)$$

$$m_y = \frac{m_\beta}{\rho \sin\gamma}\sqrt{s_1^2 \sin^2\alpha_2 + s_1^2 \sin^2\alpha_1}.$$

С учетом полученных величин

$$m_x = \frac{m_\beta}{\rho \sin\gamma}\sqrt{s_1^2 + s_2^2} + \frac{m_\beta b}{\rho \sin^2\gamma}\sqrt{\sin^2\beta_1 + \sin^2\beta_2}. \quad (1.45)$$

В формулах (1.44), (1.45) m_β — средняя квадратическая ошибка откладывания углов β_1, β_2. Для приближения расчетов, принимая $s_1 \approx s_2 = s$, вместо (1.46) имеем

$$m_з = \frac{s m_\beta}{\rho \sin\gamma}\sqrt{2}. \quad (1.46)$$

Ошибка исходных данных приводит к [2]

$$m_{исх} = \frac{m_{AB}}{\sin\gamma}\sqrt{\sin^2\beta_1 + \sin^2\beta_2} = \frac{m_{AB}}{b}\sqrt{s_1^2 + s_2^2}. \quad (1.47)$$

Для приближенных расчетов, полагая $s_1 \approx s_2 = s$:

$$m_{исх} = \frac{m_{AB}}{b} s\sqrt{2}. \quad (1.48)$$

Значения $m_ц$ и $m_ф$ обычно являются небольшими и их можно не учитывать. Подставляя в формулу (1.43) значение $m_з$ и $m_{исх}$ из формул (1.45) и (1.47), находим

$$m_к^2 = \left(\frac{m_\beta^2 b^2}{\rho^2 \sin^2\gamma} + m_{AB}^2\right)\frac{\sin^2\beta_1 + \sin^2\beta_2}{\sin^2\gamma} = \left(\frac{m_\beta^2}{\rho^2\sin^2\gamma} + \frac{m_{AB}^2}{b^2}\right)\left(s_1^2 + s_2^2\right). \quad (1.49)$$

При $s_1 \approx s_2 = s$, $\gamma \approx 90°$, $b^2 = s_1^2 + s_2^2$

$$m_к^2 = \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 b^2 + m_{AB}^2. \quad (1.50)$$

Для выяснения точности откладывания угла β из формулы (1.50) имеем

$$m_\beta = \frac{\rho}{b}\sqrt{m_к^2 - m_{AB}^2}. \quad (1.51)$$

При b = 600 м, $m_к$ = 20 мм, m_{AB} = 10 мм по формуле (1.51) получаем

$$m_\beta = \frac{206\,265''}{600\,000}\sqrt{20^2 - 10^2} = 5{,}9''.$$

Для определения выносимой точки K с повышенной точностью после определения точки K на местности на пунктах A и B соответствующим числом приемов измеряют углы β_1, β_2. Измеряют также угол γ на точке K. Распределив невязку в треугольнике поровну на все три угла, вычисляют $x_к$, $y_к$ по формулам котангенсов (Юнга):

$$x_к = \frac{x_A ctg\beta_2 + x_B ctg\beta_1 + y_B - y_A}{ctg\beta_1 + ctg\beta_2};$$

$$y_к = \frac{y_A ctg\beta_2 + y_B ctg\beta_1 + x_B - x_A}{ctg\beta_1 + ctg\beta_2}. \quad (1.52)$$

Вычисления по формулам (1.52) удобно вести по следующей схеме:

$$\begin{vmatrix} x_A & y_A \\ +1 & ctg\beta_2 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} x_B & y_B \\ -1 & ctg\beta_1 \end{vmatrix}$$

$$ctg\beta_1 + ctg\beta_2$$

$$x_к \quad y_к$$

Числитель первой формулы (1.52) получают, складывая результаты решения определителей, а числитель второй — путем складывания произведений

элементов верхней строки на находящиеся под ними элементы нижней. Если смотреть на пункт *К*, то пункт *А* должен быть слева, а пункт *В* — справа.

Сравнивая полученные координаты с их проектными значениями, определяют поправки (редукции), по которым смещают (редуцируют) приближенно вынесенную точку *К*.

4. Способ обратной угловой засечки

На местности находят приближенное положение *К'* выносимой проектной точки *К* (рис. 1.49). Над точкой *К'* устанавливают теодолит и с требуемой точностью измеряют углы β_1, β_2 как минимум на три опорные точки с известными координатами. По формулам обратной угловой засечки вычисляют координаты точки *К'* и сравнивают их с проектными значениями. По разности координат определяют величины редукций Δx, Δy или угловой θ и линейный *е* элементы и смещают точку в проектное положение *К*. Для контроля на точке *К* измеряют углы и по ним вычисляют координаты точки *К* и сравнивают их с проектными. При недопустимых расхождениях измерения повторяют.

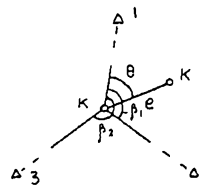


Рис. 1.49. Способ обратной угловой засечки

Вычисление координат точки *К* можно выполнить по формулам [11]:

$$x = x_1 + \Delta x,\ y = y_1 + \Delta y,$$

$$\Delta x = \frac{\kappa_1 tg\alpha - \kappa_2}{1 + tg^2\alpha} = \frac{\kappa_3 tg\alpha - \kappa_4}{1 + tg^2\alpha};\ \Delta y = \Delta x \mathrm{tg}\alpha; \qquad (1.53)$$

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\kappa_4 - \kappa_2}{\kappa_3 - \kappa_1};$$

$$\kappa_1 = (x_2 - x_1)\mathrm{ctg}\beta_1 + (y_2 - y_1);$$

$$\kappa_2 = (y_2 - y_1)\mathrm{ctg}\beta_1 - (x_2 - x_1);$$

$$\kappa_3 = (x_3 - x_1)\mathrm{ctg}\beta_2 + (y_3 - y_1);$$

$$\kappa_4 = (y_3 - y_1)\mathrm{ctg}\beta_2 - (x_3 - x_1);$$

Вычисления по этим формулам удобно выполнять по следующей схеме:

x_1	y_1	$x_2 - x_1$	$y_2 - y_1$	$x_3 - x_1$	$y_3 - y_1$	$tg\alpha = \dfrac{\kappa_4 - \kappa_2}{\kappa_3 - \kappa_1}$
x_2	y_2	-1	$ctg\beta_1$	-1	$ctg\beta_2$	$\Delta x = \dfrac{\kappa_1 tg\alpha - \kappa_2}{1 + tg^2\alpha}$
x_3	y_3	κ_1		κ_3		$\Delta x^1 = \dfrac{\kappa_3 tg\alpha - \kappa_4}{1 + tg^2\alpha}$
		κ_2		κ_4		

Контроль: $\Delta x = \Delta x^1 \quad \Delta y = \Delta x \, tg\alpha$.

Значения κ_1, κ_3 получают из решения определителей, а κ_2, κ_4 — путем суммирования результатов умножения элементов верхней строки на лежащие под ними элементы нижней строки.

Точность разбивки способом обратной угловой засечки зависит от ошибки засечки, исходных данных, центрирования теодолита и визирных целей, фиксации выносимой точки и редуцирования. При большом расстоянии от определяемой до исходных точек наиболее существенными будут влияние ошибок засечки и исходных данных.

Средние квадратические ошибки координат точки K методом обратной угловой засечки [11]:

$$m_x = \frac{m_\beta}{2F}\sqrt{\left(x_2^1 - x_1^1\right)^2 + \left(x_1^1 - x_3^1\right)^2}; \qquad (1.54)$$

$$m_y = \frac{m_\beta}{2F}\sqrt{\left(y_2^1 - y_1^1\right)^2 + \left(y_1^1 - y_3^1\right)^2},$$

где m_β — средняя квадратическая ошибка измерения угла.

Средняя квадратическая ошибка положения определяемой точки

$$M = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = \frac{m_\beta}{2F}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \qquad (1.55)$$

Если на пункте K измеряли направления способом круговых приемов, то

$$M = \frac{m_H}{2F}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}. \qquad (1.56)$$

где m_H — средняя квадратическая ошибка направления.

Входящие в формулы (1.54)–(1.56) площадь F и стороны σ_1, σ_2, σ_3 инвертного (обращенного) треугольника 1′2′3′ измеряют по схеме (рис. 1.50), на которой в произвольном масштабе по направлениям на пункты 1, 2, 3 откладывают величины $r_i = \rho/s_i$, где s_i — расстояние от пункта K до пункта i, получают обращенный треугольник 1′2′3′ со сторонами σ_1, σ_2, σ_3. Если точки 1′, 2′, 3′ лежат на одной прямой, то площадь $F = 0$, $m_x = m_y = M = \infty$, т. е. имеем неопределенность решения обратной угловой засечки.

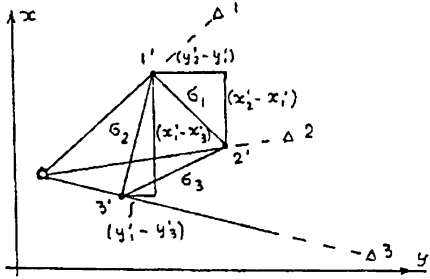


Рис. 1.50. Элементы инвертного треугольника

При $\beta_1 = 120°$, $\beta_1 = 240°$ и расстояниях $K_1 \approx K_2 \approx K_3 = s_{cp}$ (рис. 1.49)

$$M = 4{,}56\, m_\beta s_{cp},$$

где m_β — в сек. дуги, s_{cp} — в км, М — в мм.

Для приближенных расчетов в [2] при определении влияния ошибок исходных данных приведена формула

$$m_H = \frac{m_{123}}{\sin\tau} \times \frac{s_{cp}}{b_{cp}} \sqrt{4 + \cos\tau},$$

где $m_{123} = m_1 = m_2 = m_3$ — ошибки в положении исходного пункта; ω_{123} = углу 123; $\tau = \beta_2 + \omega_{123} - 180°$; $b_{cp} = b_{12} \approx b_{13}$.

При s_{cp} = 1400 м, b_{cp} = 2100 м, $\beta_2 = 220°$, $\omega_{123} = 85°$, $m_\beta = 2''$, $m_{123} = 5$ мм находим

$$M = 4{,}56 \cdot 2 \cdot 1{,}40 = 12{,}8 \text{ мм},$$

$$m_H = \frac{5 \text{ мм } 1400 \text{ м}}{2100 \text{ м } \sin 125^\circ}\sqrt{4 + \cos 125^\circ} = 7{,}5 \text{ мм},$$

$$m_к = \sqrt{m_з^2 + m_H^2} = 14{,}8 \text{ мм}.$$

5. Способ линейной засечки

В этом способе положение проектной точки K на местности определяют в пересечении проектных расстояний d_1 и d_2, его применяют в основном для разбивки осей строительных конструкций при d_1 и d_2 меньше длины мерного прибора. Одной рулеткой от A откладывают d_1, а рулеткой от точки B — отрезок d_2. Пересечение отрезков d_1 и d_2 (при совмещении нулей рулеток с точками A и B) дает определяемую точку K (рис. 1.51).

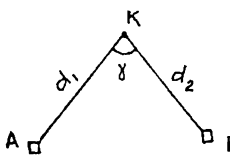


Рис. 1.51. Линейная засечка

Средняя квадратическая ошибка $m_{л3}$ линейной засечки при одинаковой точности откладывания отрезков d_1 и d_2 [2]

$$m_{л_3} = \frac{m_d\sqrt{2}}{\sin\gamma}. \qquad (1.57)$$

Величина ошибок исходных данных в линейной засечке

$$m_{исх} = \frac{1}{\sin\gamma}\sqrt{\frac{m_A^2 + m_B^2}{2}}.$$

При $m_A = m_B = m_{AB}$

$$m_{исх} = \frac{m_{AB}}{\sin\gamma}.$$

Общая ошибка

$$m_к = \frac{1}{\sin\gamma}\sqrt{2m_d^2 + m_{AB}^2}. \qquad (1.58)$$

Средняя квадратическая ошибка откладывания отрезка $d = d_1 = d_2$

$$m_d = \sqrt{\frac{m_к^2 \sin^2 \gamma + m_{AB}^2}{2}}. \qquad (1.59)$$

При $\gamma = 90°$, $m_к = 10$мм, $m_{AB} = 5$ мм находим

$$m_d = \sqrt{\frac{100-25}{2}} = 6 \text{ мм}.$$

б. Способ пересечения створов

В этом способе положение точки K определяют при пересечении створов T_1T_1' и T_2T_2'. Створы на местности задают точками их пересечения с опорными сторонами. Положение точек T_1, T_2 определяют горизонтальными проложениями d_1 и d_2 от опорной точки B по опорным линиям BA и BC, а точек T_1', T_2' — d_1', d_2' от опорной точки E по линиям EF и ED. Способ пересечения створов (рис. 1.52) обычно используют для выноса в натуру труднодоступных точек, когда использование других методов затруднено.

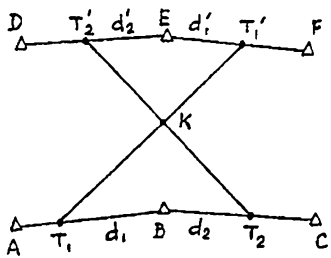


Рис. 1.52. Пересечение створов

Преимущество этого способа в том, что створы T_1T_1' и T_2T_2' и точку K легко восстановить, что обеспечивает оперативный контроль точки K в процессе строительства при минимальном объеме геодезических работ.

Средняя квадратическая ошибка $M_к$ положения точки K зависит от средних квадратических ошибок m_1 и m_2 определения створов и угла γ, под которым эти створы пересекаются [19]

$$M_K = \frac{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}{\sin\gamma}.$$

При $m_x = m_y = 5$ мм, $\gamma = 90°$ $M_к = 7{,}1$ мм.

7. Способ бокового нивелирования

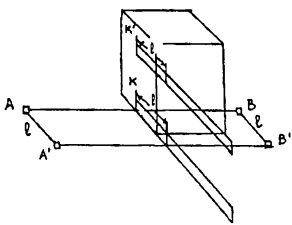


Рис. 1.53. Боковое нивелирование

Этот способ часто применяют для выноса осей при детальной разбивке и для установки строительных конструкций в проектное положение (рис. 1.53). Пересечение K линии AB с конструкцией определяют следующим образом. От точек A и B по перпендикуляру к AB откладывают отрезки l и получают точки A', B' и линию $A'B'$, параллельную AB. Над точкой A' устанавливают теодолит, приводят его в рабочее положение и перекрестие нитей наводят на точку B'. К конструкции в горизонтальном положении устанавливают рейку и перемещают ее так, чтобы отсчет по ней был равен l. Пятка рейки даст положение точки K. Подобным образом определяют и положение точки K'.

Основными ошибками бокового нивелирования являются [2]:

ошибка $m_{ств}$ разбивки параллельного створа;

ошибка $m_ц$ центрирования теодолита и визирной цели в точках A' и B';

ошибки установки рейки m_y;

ошибки отсчета по рейке m_0.

Общая средняя квадратическая ошибка

$$m^2 = m_{ств}^2 + m_ц^2 + m_y^2 + m_0^2. \qquad (1.60)$$

При $m_{ств} = 1{,}5$ мм, $m_ц = 1$ мм, $m_y = 1{,}2$ мм, $m_0 = 1{,}1$ мм;

$$m = \sqrt{1{,}5^2 + 1{,}0^2 + 1{,}2^2 + 1{,}1^2} = 2{,}4 \text{ мм}.$$

1.4.16. Геодезические разбивочные работы при возведеиии зданий и сооружений

1. Геодезическая подготовка проекта

Для выноса на местность проекта зданий необходимо с нужной точностью знать координаты его основных характерных точек на пересечении строительных осей. Определение этих координат называют *геодезической подготовкой проекта*. По генплану определяют графически координаты одной точки здания, например $A1$, и дирекционный угол его продольной оси A (рис. 1.54). По рабочим чертежам находят значения a и b между основными осями. После этого вычисляют координаты точек $A5$, $B5$, $B1$ по формулам:

$$X_{A5} = X_{A1} + a\cos\alpha_A;\ Y_{A5} = Y_{A1} + a\sin\alpha_A;$$

$$X_{B5} = X_{A5} + b\cos(\alpha_A - 90°);\ Y_{B5} = Y_{A5} + b\sin(\alpha_A - 90°);$$

$$X_{B1} = X_{A1} + b\cos(\alpha_A - 90°);\ Y_{B1} = Y_{A1} + b\sin(\alpha_A - 90°);$$

контроль: $a = \sqrt{(X_{B_5} - X_{B_1})^2 + (Y_{B_5} - Y_{B_1})^2}$.

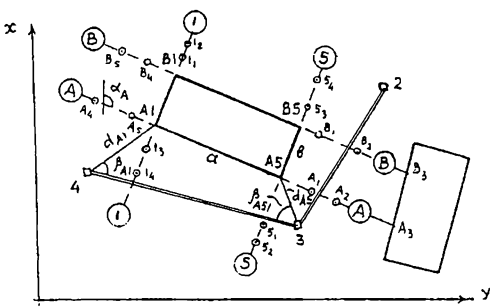


Рис. 1.54. Вынос в натуру основных осей здания

Описанный способ называют *графо-аналитическим*, он находит наиболее частое применение.

При *аналитическом способе* все данные для разбивки определяют путем математических вычислений, при этом координаты существующих сооружений определяют путем геодезических измерений на местности, а размеры элементов проекта получают из технологических расчетов. Этот способ обычно применяют при реконструкции и расширении предприятий, в стесненных условиях застройки.

Если проект сооружения не связан с существующими строениями, то можно использовать *графический способ* проектирования, когда все элементы определяют графически по топографическому плану, при этом целесообразно учитывать деформацию планов, если она превышает 0,2 мм для стороны квадрата 100 мм. Через определяемую точку *j* прочерчивают линии, параллельные линиям сетки квадратов. Измеряют отрезки *a* и *b* от северной и южной сторон квадрата до точки *j* и a_1 b_1 — от западной и восточной сторон. Координаты точки *j* определяют по формулам:

$$x_j = x_o + \frac{100}{a+b}a; \quad y_j = y_o + \frac{100}{a_1+b_1}a_1,$$

где x_0, y_0 — координаты юго-западного угла квадрата координатной сетки.

Независимо от используемого способа все геометрические элементы должны быть строго увязаны между собой и с существующими на площадке капитальными зданиями и сооружениями.

2. Вынос на местность основных осей сооружения

В первую очередь решают, каким способом целесообразно выносить проект в натуру. Для изображенного на рисунке 1.54 здания удобно использовать полярный способ. Проектное положение точки *A*1 можно получить, определив на местности направление из точки 4 на *A*1, для чего нужно отложить от опорной линии 34 угол β_{A1} и по полученному направлению отложить горизонтальное проложение d_{A1}. Закрепив точку *A*1, выносят в натуру аналогичным способом точку *A*5, при этом измеренное расстояние *A*1 — *A*5 должно с высокой точностью равняться его проектной величине *a*. При небольших размерах здания точку *A*5 получают на местности путем откладывания от *A*1 горизонтального проложения *a* по направлению оси *A*, которое находят, отложив от точки *A*1 угол

$$\alpha_1 = \alpha_{A1-4} - \alpha_A.$$

Для контроля на местности измеряют угол β_{A5} и расстояние d_{A5}. Результаты измерений сравнивают с расчетными, которые определяют аналогично β_{A1} и d_{A1}.

Проектное положение в натуре точек B_1 и B_5 находят, построив с помощью теодолита прямые углы в пунктах A_1 и A_5 и отложив проектное расстояние b. Для контроля измеряют отрезок B_1–B_5, который должен равняться расстоянию a и диагонали A_1–B_5, B_1–A_5, которые должны равняться $\sqrt{a^2+b^2}$.

Теодолитом обязательно измеряют углы построенного на местности прямоугольника, они должны быть прямыми. Кроме того, для контроля можно использовать расстояния до опорных пунктов и точек с известными координатами. При обнаружении превышающих допуски СНиП отклонений необходимо внести исправления.

Работы по выносу проекта на местность выполняют по разбивочному чертежу, входящему в комплект проектной документации и содержащему все разбивочные и контрольные характеристики.

3. Закрепление на местности основных осей сооружения

Строительные оси *А*, *В*, 1, 5 (см. рис. 1.54) закрепляют на местности центрами, которые размещают вне зоны строительных работ на расстоянии от здания не менее его полуторной высоты.

Центры получают с помощью теодолита, для чего его устанавливают над точкой *А*1 и центрируют. Перекрестие сетки нитей визируют на точку A_5 и на продолжении этого направления устанавливают центры A_1, A_2 и делают маркировку A_3 на стене капитального здания. После этого трубу теодолита поворачивают на 180° и фиксируют центры A_4, A_5. Установку центров выполняют при двух положениях вертикального круга теодолита. Подобным образом устанавливают центры 1_1, 1_2, 1_3, 1_4, закрепляющие поперечную ось 1. Аналогичным образом устанавливают центры на створах *В*, 5.

Конструкция центров, рекомендованная СНиПом, предусматривает возрастание их надежности с увеличением высоты здания и сроков строительства.

4. Вынос в натуру контуров котлована

Для заложения фундамента и подземной части здания роют котлован, при этом нужно обозначить на местности границы котлована на уровне его дна и поверхности земли. Для этого от вынесенных на местность осей здания откладывают во внешнюю сторону $l_{дн}$ — ширину пазухи на уровне дна котлована, и отрезок $l_{отк}$ — ширину откоса в плане. Значение $l_{дн}$ задается проектом, а $l_{отк}$ определяют в зависимости от глубины котлована и крутизны его откосов. При

одинаковой глубине h котлована по всему его контуру ширина откосов постоянна, и горизонтальное проложение L от верхней бровки котлована до сооружения определяют то формуле

$$L = l_{дн} + l_{отк} = l_{дн} + hm = l_{дн} + h/i,$$

где i, m — уклон и коэффициент откоса соответственно.

Если глубина котлована изменяется в связи с рельефом поверхности земли, то $l_{отк}$ и L также изменяются.

5. Геодезические работы при сооружении котлована

Обычно грунт из котлована вынимают землеройными машинами. После первичной разработки котлована на его дно переносят главные оси сооружения. Так как с установленных центров (см. рис. 1.54) это сделать невозможно, особенно при большой глубине котлована, то с помощью теодолита колышками или штырями закрепляют дополнительные створные точки в непосредственной близости от бровок котлована. Если для детальной разбивки здания сооружена обноска, то створ оси фиксируют на обноске. Теодолит устанавливают в рабочее положение над закрепленной у бровки точкой и наводят перекрестие нитей сетки зрительной трубы на одну из удаленных створных точек данной оси. После этого, опустив трубу, отмечают колышками на дне котлована перенесенную туда ось.

Подобным способом переносят и закрепляют на дне котлована другие оси. От этих осей на дне котлована уточняют его нижнюю бровку. Параллельно осям строят сетку квадратов, вершины которых закрепляют колышками. Передают с поверхности земли отметку на один из колышков, который используют как временный репер, другие колышки устанавливают на проектную отметку дна котлована или подписывают на них величину срезки (подсыпки) грунта.

Зачистку дна и откосов котлована выполняют вручную или бульдозером. После зачистки делают исполнительную съемку дна котлована по квадратам, в результате которой определяют фактические отметки точек, которые сравнивают с проектными, и выполняют корректировку.

6. Геодезические работы при сооружении фундамента

Геодезические работы зависят от типа фундамента и глубины котлована. При неглубоком заложении фундамента вдоль верхней бровки котлована параллельно оси здания строят обноску, т. е. доски или металлические штанги укрепляют на столбах на высоте около 1 м, нивелиром обноску устанавливают строго горизонтально. Наиболее удобна сплошная обноска, но часто приме-

няют *створную обноску*, состоящую из отдельных деревянных или металлических «строительных скамеек» (рис. 1.55). Каждая пара скамеек, установленных на противоположных сторонах здания, закрепляет на местности только одну строительную ось. Вместо скамеек можно использовать столбики, при этом требования к параллельности осям здания и горизонтальности те же, что и для сплошной обноски.

После сооружения обноски на нее теодолитом переносят основные оси. Используя основные оси в качестве исходных, строят на обноске все другие оси сооружения, для чего предварительно на специальном разбивочном чертеже показывают оси сооружения и расстояния между ними. Одну продольную и одну поперечную основные оси принимают за исходные, от них по противоположным сторонам обноски инварной лентой или стальной компарированной рулеткой откладывают согласно разбивочному чертежу проектные расстояния между осями. Контролем является совпадение сумм всех отложенных вдоль данной стороны здания проектных расстояний между осями с общей длиной. В результате на обноске обозначают все оси сооружения, образующие *осевую разбивочную систему*.

При глубоком заложении фундамента или сложной конфигурации обноску устанавливают в котловане вдоль его нижней бровки, при этом размеры котлована должны быть увеличены. Для фундамента из монолитного железобетона на дне котлована, имеющем отметку, сооружают опалубку, в которую устанавливают арматуру и заполняют бетоном. Положение опалубки в котловане определяют от соответствующих строительных осей, для чего строительные оси на местности обозначают тонкой стальной проволокой или леской, натянутой между метками противоположных сторон обноски. Нитяным отве-

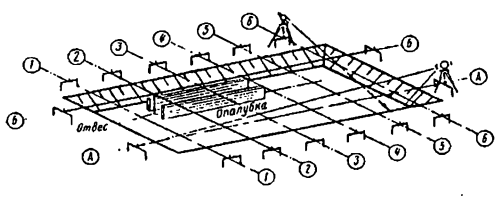


Рис. 1.55. Схема детальной разбивки фундамента

сом оси проектируют на дно котлована и от них откладывают проектные расстояния до бортов опалубки. На опалубку переносят проектную отметку верха фундамента, вертикальность бортов опалубки контролируют отвесом.

Сборные фундаменты из готовых блоков обычно устанавливают без обноски. Выровняв с помощью нивелира основание, теодолитом устанавливают места угловых фундаментных блоков и блоков на пересечениях осей и в промежутках между ними не реже чем через 15–20 м. На верхнюю поверхность установленных блоков переносят и маркируют строительные оси, для контроля измеряют расстояния между ними. Через метки на крайних блоках натягивают струну или леску и откладывают вдоль полученных линий проектные расстояния между рядовыми блоками. Чтобы натянутая струна не мешала укладке блоков, ее смещают параллельно оси на нужное расстояние.

Для свайных фундаментов место забивки каждой сваи определяют промером вдоль оси фундамента (если сваи расположены рядами). Местоположение свай, расположенных вне оси фундамента, определяют методом перпендикуляров. Предварительно строительные оси проектируют в котлован и закрепляют колышками или на строительных скамейках. После забивки свай на них нивелиром выносят отметки, по которым затем оголовки свай срезают. Для обеспечения равномерной нагрузки на сваи на их оголовках из монолитного железобетона сооружают опорную плиту — ростверк, для чего от осей фундамента разбивают и строят опалубку. Проектную отметку верха ростверка выносят на опалубку от ближайших реперов. После бетонирования горизонтальность поверхности фундамента проверяют нивелиром. Плановую съемку фундамента обычно выполняют методом перпендикуляров от строительных осей, которые предварительно выносят на верх фундамента. Более тщательно контролируют плановое и высотное положения анкерных болтов и других закладных деталей, различных выступов, проемов и т. п. По результатам исполнительной съемки составляют исполнительную схему, являющуюся основанием для приемки фундамента и выдачи разрешения на дальнейшие строительные работы.

7. Геодезические работы при строительстве наземной части здания

При сооружении кирпичного здания сначала от строительных осей на фундаменте строят контур внешней и внутренней поверхностей несущих стен. В процессе кладки не реже двух раз на 1 м высоты проверяют горизонтальность рядов кирпичей и нитяным отвесом — вертикальность стены. Дверные и оконные проемы, перегородки и т. п. разбивают от осей несущих стен рулеткой.

Горизонтальность и высоту несущих стен перед укладкой плит перекрытий проверяют нивелиром и Г-образной рейкой. При обнаружении отклонений их исправляют путем изменения толщины цементной стяжки. После укладки плит перекрытия оси здания выносят на уровень следующего этажа.

При использовании в конструкции здания колонн на их фундаменты переносят соответствующие строительные оси и закрепляют их рисками (рис. 1.56). На фундаменты колонн помещают опорные башмаки, установочные риски, которые совмещают с ориентирными рисками на фундаменте. Отметку дна стакана определяют геометрическим нивелированием.

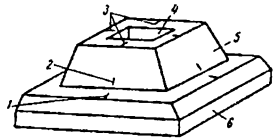


Рис. 1.56. Схема ориентирных и установочных рисок на фундаменте и опорных башмаках колонны:
1 — ориентирные риски фундаментного блока;
2 — установочная риска; 3 — ориентирные риски опорного башмака;
4 — отверстие для установки колонны;
5 — опорный башмак (стакан); 6 — фундамент

Перед монтажом колонн на них наносят риски. Установочные риски маркируют с четырех сторон колонны на разных высотах. Высотную риску в виде черты наносят в нижней части колонны на расстоянии не менее 100 мм от основания, такую же риску маркируют в верхней части колонн. Колонну поднимают за верхнюю часть и устанавливают в стакан, на дно которого кладут металлическую пластину, ее толщину определяют путем геометрического нивелирования с учетом установки всех колонн на одном уровне по высоте.

С помощью деревянных клиньев или специальной оснастки колонну перемещают до совпадения установочных рисок на ней с ориентирными рисками на стакане. При высоком положении риски на колонне ее проектируют нитяным отвесом. С помощью расчалок колонну устанавливают в вертикальное положение, контроль вертикальности осуществляют двумя теодолитами, установленными так, чтобы их коллимационные плоскости пересекались на колонне примерно под углом 90° (рис. 1.57). После этого стакан бетонируют.

При строительстве сборных крупнопанельных зданий на фундамент в пределах зоны монтажа выносят строительные оси. На этажах разбивку делают от строительных осей элементов стен, лестниц и т. п., для установки в проектное положение элементов конструкций используют телескопические откосы, упоры, различные захваты и т. п.

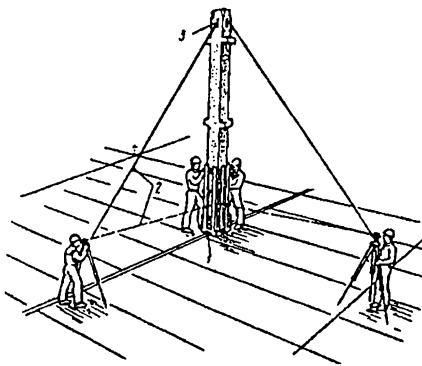


Рис. 1.57. Выверка колонн по вертикали: 1 — ориентирная риска; 2 — визирный луч; 3 — установочная риска

При строительстве сборных крупнопанельных зданий на фундамент в пределах зоны монтажа выносят строительные оси. На этажах разбивку делают от строительных осей элементов стен, лестниц и т. п., для установки в проектное положение элементов конструкций используют телескопические откосы, упоры, различные захваты и т. п.

При возведении высотных зданий фундамент устанавливают в виде монолитной плиты на всю площадь здания. В плиту закладывают металлические центры, взаимное положение которых определяют с высокой точностью путем включения в опорную геодезическую сеть, от пунктов этой сети определяют и закрепляют положение всех строительных осей. На каждый новый этаж пункты опорной сети переносят методом вертикального проектирования.

1.4.17. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации подземных коммуникаций

К подземным коммуникациям относят [2]:

1) трубопроводы — сети водопровода, канализации, газоснабжения, теплофикации, водотока и другие сооружения для транспортирования различного содержимого по трубам;
2) кабельные сети, передающие электроэнергию, которые различают по напряжению и назначению;
3) коллекторы — подземные сооружения сечением от 1,8 до 3,0 м^2, в них прокладывают трубопроводы и кабели различного назначения.

Наиболее часто при прокладке подземных сетей используют открытый способ, когда коммуникации укладывают в траншеях. Разбивочные работы заключаются в выносе на местность оси трассы, центров колодцев, углов поворота и др.

На вынос трассы выдают специальное техническое задание. Основным документом является *разбивочный чертеж*, на котором кроме оси трассы и основных ее характеристик (углов, расстояний) показывают пункты геодезических опорных сетей, красные линии и стабильные долговременные элементы ситуации, используемые для нахождения на местности проектного положения трассы. Начало и конец трассы, углы поворота и точки врезки привязывают к трем и более опорным точкам (рис. 1.58), при этом расстояния не должны превышать длины мерного прибора.

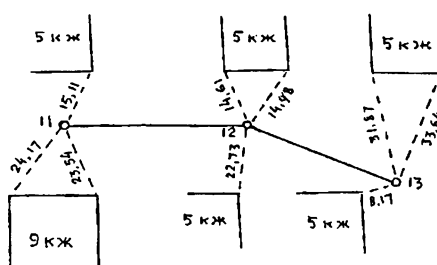


Рис. 1.58. Фрагмент разбивочного чертежа для выноса в натуру трассы трубопровода

Исходным для составления разбивочного чертежа является крупномасштабный план местности с нанесенным на него проектом трассы. Если коммуникация проходит по незастроенной местности с малым количеством надежных контуров, то для определения на местности проектного положения трассы прокладывают теодолитный ход.

Вынос трассы в натуру предусматривает определение на местности начала и конца трассы, поворотных точек, колодцев и других объектов. Для определения начала и конца трассы используют метод перпендикуляров и линейных засечек, исходными пунктами служат стабильные и четко определяемые на плане и местности точки. Вынесенные на местность элементы трассы закрепляют временными знаками.

На территории с небольшим количеством контуров для выноса трассы в натуру прокладывают теодолитный ход, его вершины нужно выбирать ближе к ожидаемым углам поворота трассы. Горизонтальные расстояния между вершинами вынесенной трассы измеряют мерными приборами и результаты сравнивают с проектными значениями. Разности не должны превышать установленных допусков, при недопустимых расхождениях следует выяснить их причину и при необходимости разбивку переделать. При допустимых расхождениях приступают к разбивке колодцев, для чего, задав теодолитом створ прямолинейного участка, мерным прибором откладывают соответствующие проектные расстояния. При разбивке санитарно-технических коммуникаций допускаются продольные сдвиги до 0,3–0,5 м, к поперечным сдвигам предъявляют более жесткие требования, так как они приводят к нарушению прямолинейности трассы, что осложняет укладку труб.

Углы поворота трассы на местности закрепляют методом пересечения створов. Для получения створа тонкую проволоку или леску натягивают так, чтобы она проходила над точкой поворота трассы, и закрепляют створными знаками за пределами полосы земляных работ. При земляных работах колышек в вершине трассы будет уничтожен, и его положение находят на пересечении восстановленных створов. Наиболее благоприятным углом пересечения створов является прямой, в любом случае угол между створами не должен быть меньше 60°.

Детальную разбивку траншеи и укладку труб выполняют с помощью обноски (рис. 1.59), установленной поперек траншеи на высоте 0,4–0,8 м. Обноски устанавливают вдоль трассы над каждым колодцем, но не реже чем через 50–100 м. С помощью теодолита, установленного (центрированного) над створной точкой, продольную ось трассы переносят на Т-образную визирку обноски. По высоте визирку устанавливают нивелиром, в итоге линия,

проходящая через верх всех визирок, должна быть параллельна оси трассы. Кроме продольной оси на обноске закрепляют дополнительные оси, например оси бровки траншеи, ширину дна и т. п.

Детальную разбивку траншеи выполняют для производства земляных работ. Через 10–20 м на местности колышками отмечают ось и бровки траншеи, для чего между осевыми метками на визирках смежных обносок натягивают струну и отвесом, закрепленным на струне, проектируют положение оси на землю и закрепляют колышком, от которого по обе стороны рулеткой откладывают половину ширины траншеи. Глубину выемки грунта из траншеи определяют переносной ходовой визиркой, ее длина равна высоте стационарных визирок над проектной отметкой дна траншеи. Если верх ходовой визирки установить на прямой, соединяющей верх стационарных визирок, то ее основание будет совпадать с проектной отметкой дна траншеи.

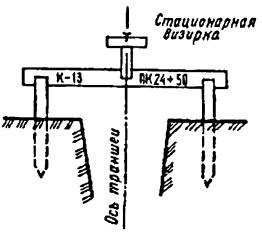


Рис. 1.59. Обноска при разбивке траншеи

Чтобы не повредить основание траншеи, на которое будут укладывать трубы, экскаватор не должен вынимать грунт до проектной отметки, последние несколько сантиметров грунта из траншеи вынимают вручную, уровень дна контролируют по ходовой визирке.

После зачистки дна траншеи выполняют разбивку колодцев. Центры угловых колодцев определяют путем пересечения осей смежных прямолинейных участков трассы, отмеченных струнами, натянутыми между осевыми метками стационарных меток. Точку пересечения струн отвесом проектируют на дно траншеи, в этой точке забивают штырь-маяк, головку которого выносят на проектную отметку от ближайшего репера нивелиром. Штырь-маяк отмечает центр колодца и отметку дна его лотка. Укладку труб выполняют обычно после установки колодцев.

Самотечные трубопроводы большого диаметра обычно имеют небольшие уклоны (0,0005–0,005). Для выноса таких уклонов в натуру с ошибкой менее 10% проектные отметки дна лотка трубопровода (дна трубы) нужно определять с ошибкой не более нескольких миллиметров, что можно обеспечить геометрическим нивелированием установленных через 5–10 м на проектных отметках штырей-маяков или колышков с шурупами, ввинченными в торцы. Высоту головки шурупа можно изменять ввинчиванием или вывинчиванием его из торца

колышка. До уровня, отмеченного в траншее штырями-маяками или головками шурупов, укладывают бетон, на бетонную поверхность укладывают трубы. Перед засыпкой траншеи трубопровода выполняют его исполнительную съемку.

1.4.18. Геодезические методы определения деформаций сооружений

1. Виды деформаций

В геодезии под термином «деформация» понимают изменение положения объекта относительно его первоначального состояния. Постоянное давление массы сооружения приводит к уплотнению грунта под фундаментом и вблизи него и вертикальному смещению, или *осадке*, сооружения. Кроме давления массы сооружения осадка может происходить от изменения уровня грунтовых вод, карстовых, оползневых и сейсмических явлений, от работы тяжелых механизмов и т. д. При уплотнении пористых и рыхлых грунтов происходит быстрая по времени деформация, называемая *просадкой*.

Если грунты под фундаментом сооружения сжимаются неодинаково или нагрузка на грунт различная, то осадка является неравномерной и приводит к горизонтальным смещениям, сдвигам, перекосам, прогибам, в результате появляются трещины и даже разломы.

Смещение сооружений в горизонтальной плоскости может происходить вследствие бокового давления грунта, воды, ветра и т. п. Высокие сооружения башенного типа (телебашни, дымовые трубы и т. п.) из-за неравномерного нагрева солнцем, давления ветра и по другим причинам испытывают *кручение* и *изгиб*.

Для определения деформаций в характерных точках сооружения устанавливают марки и путем геодезических измерений находят изменение их пространственного положения за выбранный промежуток времени, при этом первый цикл геодезических наблюдений принимают за начальный.

Абсолютные, или *полные*, осадки S марок определяют как разность отметок, полученных относительно репера, расположенного за воронкой осадок сооружения и принимаемого за неподвижный, в текущий момент времени ($H_{тек}$) и в начале наблюдений ($H_{нач}$), т. е. $S = H_{тек} - H_{нач}$. Подобным образом находят осадку между предыдущим и последующим циклами наблюдений.

Средняя осадка $S_{ср}$ всего сооружения или отдельных его частей

$$S_{ср} = \frac{\sum_{1}^{n} s}{n},$$

где S — осадка отдельных марок; n — количество марок.

Наряду со средней осадкой отмечают наибольшую S_{max} и наименьшую S_{min} осадки марок. *Неравномерность* осадки определяют по разности осадок

$$\Delta S_{j,i+1} = S_{i+1} - S_j,$$

где S_i, S_{i+1} — осадки точек в циклах i и $i+1$.

Крен, или *наклон*, сооружения равен разности осадок $(S_2 - S_1)$ двух точек вдоль выбранной оси или на противоположных краях здания. Наклон вдоль продольной оси называют *завалом*, а вдоль поперечной оси — *перекосом*. *Относительный крен*

$$K = (S_2 - S_1)/l,$$

где S_1, S_2 — осадки в точках 1 и 2, l — расстояние между этими точками. Горизонтальное смещение

$$q_x = x_{тек} - x_{нач}, q_y = y_{тек} - y_{нач},$$

где $x_{нач}$, $y_{нач}$, $x_{тек}$, $y_{тек}$ — координаты точек в начальном и текущем циклах наблюдений. Аналогично вычисляют смещение между предыдущим и последующим циклами наблюдений.

Кручение равно изменению углового положения радиуса точки с началом в центре исследуемого горизонтального сечения. Кручение относительно вертикальной оси в основном имеют сооружения башенного типа.

Средняя скорость $\upsilon_{ср}$ деформации равна отношению величины деформации к промежутку времени t, за который эта деформация происходит. Средняя скорость осадки

$$\upsilon_{ср} = (s_j - s_i)/t,$$

где s_j, s_i — осадки за время t между циклами i и j.

Если t равно числу месяцев, то получают среднемесячную скорость, если t — число лет, то находят среднегодовую скорость деформации или осадки.

Деформации определяют для оценки устойчивости сооружения, проверки правильности проектных расчетов, выявления причин и закономерностей для прогнозирования деформаций и принятия мер, обеспечивающих нормальное состояние сооружения.

Для сложных и уникальных сооружений на площадке будущего строительства изучают влияние природных факторов на устойчивость грунта, создают систему опорных пунктов и определяют их стабильность. Наблюдения выполняют с начала возведения сооружения и продолжают в течение строительства, а в большинстве случаев и в течение всего периода эксплуатации.

Наблюдения, выполняемые через определенные промежутки времени (по календарному плану), называют *систематическими*.

При резком изменении деформации выполняют *срочные* наблюдения. Параллельно с определением деформации выполняют *специальные* наблюдения за изменением состояния грунтов и подземных вод, температуры тела сооружения, изменением метеоусловий и т. д. Учитывают также изменение строительной нагрузки и нагрузки от установленного оборудования.

Для выполнения наблюдений составляют специальный проект, который содержит: техническое задание на производство работ; общие сведения о сооружении, природных условиях; схему опорных пунктов и марок; методику наблюдений и их обработки; расчет точности измерений; календарный план (график) наблюдений; состав исполнителей; объем работы и смету.

2. Точность и периодичность наблюдений

В нормативных документах точность определения осадок и горизонтальных смещений выражают средней квадратической ошибкой. Для многих практических задач среднюю квадратическую ошибку m_g определения деформации можно вычислить по формуле [2]

$$m_g < 0{,}2\ \Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ — величина деформации между циклами измерений.

Согласно ГОСТ 24846-81 допустимые погрешности определения осадок не должны быть более:

1 мм — для уникальных зданий, длительное время (более 50 лет) находящихся в эксплуатации, а также на скальных грунтах;

2 мм — для зданий и сооружений на песчаных, глинистых и других сжимаемых грунтах;

5 мм — для зданий и сооружений на насыпных, просадочных и других сильно сжимаемых фунтах;

10 мм — для земляных сооружений.

Крены труб, мачт и т. п. определяют с точностью до 0,0005 H, где H — высота сооружения.

Промежуток времени между циклами измерений зависит от вида сооружений, скорости изменения деформации и др. В строительный период систематические наблюдения в среднем выполняют 1–2 раза в квартал, в период эксплуатации — 1–2 раза в год. При срочных наблюдениях их выполняют до и после выявления факторов, резко изменяющих обычный ход деформации.

3. Геодезические знаки

Правильный выбор конструкции и мест размещения геодезических знаков существенно влияет на качество результатов наблюдений. Геодезические знаки делят на:

опорные, являются исходной основой, относительно которой определяют положение марок; их размещают и закрепляют с условием стабильности и длительной сохранности;

вспомогательные, через которые передают координаты и высоты от опорных знаков к деформационным;

деформационные, их закрепляют на исследуемом сооружении, перемещаясь с ним, они показывают изменение его положения в пространстве.

Для *плановых* опорных знаков широко используют трубчатые конструкции; стальная труба диаметром 100–300 мм, которую заглубляют и бетонируют в грунт не менее 1 м ниже верхней границы твердых коренных пород. К верхнему концу (фланцу) крепят головку знака. Вокруг основной трубы помещают защитную трубу, пространство между ними заполняют битумом, а в верхней части — легким теплоизоляционным материалом, знак закрывают крышкой.

Для опорных *высотных* реперов также применяют трубчатые конструкции, для учета температурных деформаций используют две трубы: стальную и дюралюминиевую, такой репер называют *биметаллическим*.

При определении деформаций промышленных и гражданских зданий применяют свайные знаки и реперы с поперечным сечением 180–250 мм.

Деформационные знаки для определения горизонтальных смещений — это в основном визирные цели, закрепленные на сооружениях или на кронштейнах, в полу сооружения — металлические пластины с нанесенным на них перекрестием. Большинство осадочных реперов имеют сферические головки, на которые устанавливают нивелирную рейку. Возможно закрепление на сооружении постоянных шкал, при этом не требуется рейка.

Опорные знаки размещают ближе к сооружению, но вне зоны возможных деформаций. Число опорных знаков, не менее трех, должно обеспечивать взаимный контроль за их устойчивостью.

Деформационные знаки для определения горизонтальных смещений промышленных и гражданских зданий располагают по периметру не реже, чем через 15–20 м, по углам и по обе стороны осадочных швов. На плотинах гидроузлов знаки устанавливают в галереях и по верху плотины не менее двух марок на секцию. На причальных и подпорных стенках реперы размещают через 30 м. Высотные знаки (марки) на зданиях устанавливают по углам,

по периметру через 10–15 м и по обе стороны деформационных швов, на колоннах, в примыкании продольных и поперечных стен, на причальных и подпорных стенах — через 15–20 м. На дымовых трубах, доменных печах, башнях и т. п. устанавливают несколько ярусов деформационных знаков.

4. Наблюдения за осадками сооружений

Осадки сооружения определяют геометрическим и тригонометрическим нивелированием, гидро- и микронивелированием, фото- и стереофотограмметрическим способами. Наиболее широко используют способ геометрического нивелирования, обладающий высокой точностью и быстротой измерений. Превышения между точками на расстоянии 5–10 м можно определять с точностью до 0,05–0,1 мм, а на расстоянии сотен метров — с точностью до 0,5 мм.

При определении осадок бетонных плотин гидроузлов применяют нивелирование I и II классов со средними квадратическими ошибками измерения превышений на станции 0,3 и 0,4 мм. При определении осадок промышленных и гражданских зданий используют нивелирование II и III классов, средние квадратические ошибки превышений на станции в этих случаях равны 0,4 и 0,9 мм соответственно. Отметки деформационных точек (марок) на весь период наблюдений определяют относительно исходного опорного репера, для которого условно принимают отметку, равную 10,000 или 100,000 м. При измерениях высокой точности используют тщательно отъюстированные высокоточные нивелиры типа Н-05, штриховые инварные или специальные малогабаритные рейки. Нивелир устанавливают строго посередине между марками, отсчеты берут по основной и дополнительной шкалам. Нивелируют при двух горизонтах прибора в прямом и обратном направлениях при длине визирного луча до 25 м и его высоте над почвой или полом не менее 0,5 м, при отчетливых и спокойных изображениях штрихов рейки.

Полученные результаты уравнивают, оценивают фактическую точность отметок, по разностям отметок в циклах строят графики осадок и т. п.

Способ тригонометрического нивелирования используют при определении осадок марок, расположенных на значительно разных высотах (высотные здания, башни и т. п.). Точность — порядка 0,1 мм — возможна при коротких (до 100 м) расстояниях с применением теодолитов типа Т2 и специальной методики измерений зенитных расстояний с точностью порядка 5″, при однообразной установке теодолита во всех циклах, строгой вертикальности реек, при условиях минимального влияния вертикальной рефракции и других источников ошибок, расстояния от прибора до определяемых точек нужно измерять с точностью до 3–5 мм.

Гидронивелирование обеспечивает точность геометрического нивелирования и позволяет создавать стационарные автоматизированные системы с дистанционным съемом информации. Система гидростатического нивелирования позволяет автоматически с помощью электрических и оптико-электронных датчиков определять изменение уровня жидкости в сосудах. Гидродинамическое нивелирование расширяет диапазон измерений и упрощает процесс автоматизации наблюдений за осадками. Система позволяет измерять со средней квадратической ошибкой порядка 0,1 мм.

Способ микронивелирования используют при определении превышений между точками, расположенными на расстоянии 1–1,5 м (изучение осадок и наклонов балок, ферм, технологического оборудования). Измерения выполняют микронивелиром.

Фото- и стереофотограмметрический способы основаны на фотосъемке исследуемого объекта фототеодолитом в начальный и последующие циклы и определении разности координат точек сооружения по этим снимкам.

При **фотограмметрическом способе** деформацию определяют в одной плоскости (обычно в плоскости стены здания), при этом фототеодолит целесообразно устанавливать так, чтобы плоскость снимка была параллельна стене исследуемого сооружения. В разных циклах фототеодолит нужно устанавливать в одной и той же точке при неизменном ориентировании камеры. Для обработки результатов необходимо знать отстояние фотокамеры от объекта и фокусное расстояние объектива камеры.

При **стереофотограмметрическом способе** определяют пространственное положение объекта, т. е. деформацию определяют по трем координатам. Фотографирование объекта в каждом цикле выполняют с одних и тех же двух точек базиса известной длины. В результате получают стереопару, позволяющую строить модель объекта и путем измерения координат точек модели определять деформацию. Обработку в обоих способах целесообразно выполнять на стереокомпараторе с последующими вычислениями по строгим формулам на ЭВМ. Средняя квадратическая ошибка определения деформации этими способами равна 1,0 мм и менее.

При использовании геометрического нивелирования среднюю квадратическую ошибку единицы веса, обычно измеренного на станции превышения, целесообразно определять по невязкам замкнутых полигонов по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{N}\left[\frac{w^2}{n}\right]}. \qquad (1.61)$$

где W, n — невязка и число станций в полигоне; N — число полигонов. Веса p отметок узловых точек и марки в наиболее слабом месте нивелирной сети можно вычислить методом приближений. Средние квадратические ошибки определения отметок узловых точек и марки в наиболее слабом месте вычисляют по формуле

$$m = \frac{\mu}{\sqrt{p}}. \qquad (1.62)$$

Если отметки марок определены независимо несколько раз, то средняя квадратическая ошибка арифметической средины из n определений

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}}. \qquad (1.63)$$

5. Наблюдения за горизонтальными смещениями сооружения

Горизонтальные смещения сооружений или их элементов определяют различными способами: линейно-угловым, створным, стереофотограмметрическим. Используют, кроме того, прямые и обратные отвесы.

Линейно-угловые построения создают в виде специальных сетей триангуляции и трилатерации, ходов полигонометрии, комбинированных сетей, угловых и линейных засечек, сетей из вытянутых треугольников с измеренными сторонами и высотами. Углы измеряют с высокой точностью (0,5–2,0″) при коротких сторонах, большом количестве связей. Уравнивание линейно-угловых сетей выполняют строгим способом. Величины смещений определяют по разностям координат в различных циклах.

Створные наблюдения используют для определения деформаций прямолинейных сооружений. Направление створа принимают за ось абсцисс, а направление смещений — за ось ординат. Величины смещений равны разностям ординат (нестворностей), определенных в различных циклах. Нестворность чаще определяют методом подвижной марки или малых углов. Створную линию задают струнным и оптическим методами.

При **методе подвижной марки** оптический прибор устанавливают так, чтобы его коллимационная плоскость совпадала со створной AB (рис. 1.60, *а*). Марку устанавливают в точке C и затем ее перемещают до совпадения оси марки с линией AB (створа), это положение фиксируют по отсчетному устройству марки. Если известен отсчет n_c, когда ось марки совпадала с точкой C, то нестворность $q_c = n_c - n_{AB}$, где n_{AB} — отсчет, когда ось марки находилась на створе AB.

При *методе малых углов* нестворность q_c определяют путем измерения угла α и расстояния S, значение $q_c = S\alpha/\rho$.

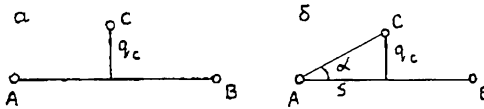


Рис. 1.60. Определение величины нестворностей методами: подвижной марки (*а*), малых углов (*б*)

6. Наблюдения за кренами, трещинами, оползнями

Наиболее просто крен определяют с помощью отвеса или прибора вертикального проектирования, их применяют при возведении башенных сооружений, когда можно встать над центром сооружения. Часто для определения крена применяют **способ вертикального проектирования**. Теодолит устанавливают на двух взаимно перпендикулярных направлениях. Линейку располагают горизонтально, ее нулевое или какое-либо другое деление совмещают с меткой M_1 (рис. 1.61). Теодолитом из положения I при двух кругах наводят на верхнюю метку M_1', проектируют на линейку и берут отсчеты q_1^1 и q_2^1, среднее из которых $q_1 = 0{,}5\left(q_1^1 + q_2^1\right)$. Таким же методом со станции II определяют q_2. Суммарный крен q, учитывая перпендикулярность q_1 и q_2, $q = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}$. Направление крена определяют из выражения

$$tg\alpha = \frac{q_1}{q_2},$$

где α — горизонтальный угол, отсчитываемый по часовой стрелке от оси *A*, т. е. от направления визирования с первой станции. Угол *z* между осью сооружения (колонны) и вертикальной линией

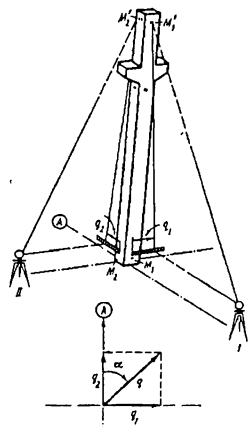


Рис. 1.61. Схема определения крена колонны

$$z = \frac{q\rho}{h},$$

где h — разность высот осевых меток.

Если на сооружении нет меток, то для определения крена используют его ребра, или грани.

Способ координат. Вокруг сооружения на расстоянии, равном 1,5–2 его высотам, прокладывают замкнутый полигонометрический ход, в условной системе вычисляют координаты его пунктов. С этих пунктов прямой засечкой определяют координаты верхнего и нижнего положений оси (ребра, грани) сооружения. По разностям координат определяют составляющие крена по осям координат, полную его величину и направление крена.

Наблюдения за трещинами сводятся к прикреплению к конструкции поперек трещины в наиболее широком ее месте маяка — плитки из гипса, алебастра и т. п. Появление через некоторое время трещины на маяке свидетельствует об активном развитии деформации. Ширину трещины измеряют линейкой или специальными приборами: деформометрами, щелемерами, измерительными скобами.

Оползни в зависимости от их вида и активности наблюдают геодезическими методами, которые подразделяют на четыре группы [2]:

осевые (одномерные), когда смещение закрепленных на оползне точек определяют относительно заданной линии или оси;

плановые (двухмерные) — по изменению плановых координат закрепленных на оползне точек (оползневых точек);

высотные — по изменению высот оползневых точек;

пространственные (трехмерные) — по изменению трех координат оползневых точек.

Оползневые методы используют при известном направлении движения оползней, их подразделяют на:

метод расстояний, когда через определенные промежутки времени измеряют расстояния по прямой линии между пунктами, установленными вдоль движения оползня;

метод створов, установленных в перпендикулярном движению оползня направлении, и периодическому измерению расстояний от створов до оползневых точек;

лучевой метод определения смещения оползневых точек по изменению направлений визирного луча относительно опорной линии, на одном из пунктов которой устанавливают теодолит.

Кроме того, плановые смещения оползневых точек определяют методами прямых угловых и линейных засечек, обратной засечки, полигонометрии и другими способами. Высотные смещения оползневых точек определяют методами геометрического и тригонометрического нивелирования. Пространственное смещение оползневых точек можно определить фототеодолитной съемкой.

Смещение оползневых точек определяют относительно опорных пунктов, расположенных вне оползневого участка. Наблюдения за оползнями выполняют не реже одного раза в год. В зависимости от скорости движения оползня периодичность наблюдений может корректироваться: время между наблюдениями уменьшается в периоды активизации оползня и увеличивается в периоды угасания.

7. Обработка и анализ результатов наблюдений

Рассмотрим этот вопрос на примере более распространенного вида работ — наблюдения за осадками. После завершения очередного цикла выполняют оценку точности, используя формулы (1.61)–(1.63) или формулу

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{r}},$$

где r — число избыточных измерений, $[pv^2]$ находят из уравнивания. При уравнивании на ЭВМ оценка точности предусмотрена программой.

По результатам уравнивания составляют ведомость отметок марок, а по их разностям определяют осадки, которые можно вычислить относительно начального цикла или относительно предыдущего.

Если точность определения осадок соответствует существующим допускам, то выполняют анализ полученных результатов. Для большей наглядности их представляют в графическом виде (рис. 1.62, 1.63).

Кроме графиков, изображенных на рисунках 1.62, 1.63, на топографической основе масштаба 1:500 или 1:1000 строят пространственные графики так же, как рисуют рельеф горизонталями (рис. 1.64). Исходными служат осадки марок между двумя циклами: текущим и начальным, текущим и предыдущим и т. п. При анализе выявляют неравномерный характер осадок. Особое внимание уделяют зданиям, подверженным большим осадкам, особенно неравномерным, сведения об этом передают в соответствующие организации для принятия необходимых мер.

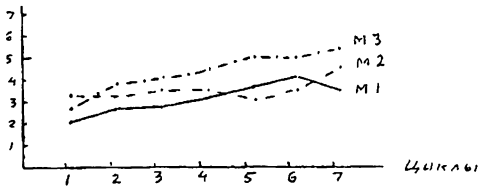


Рис. 1.62. График осадок

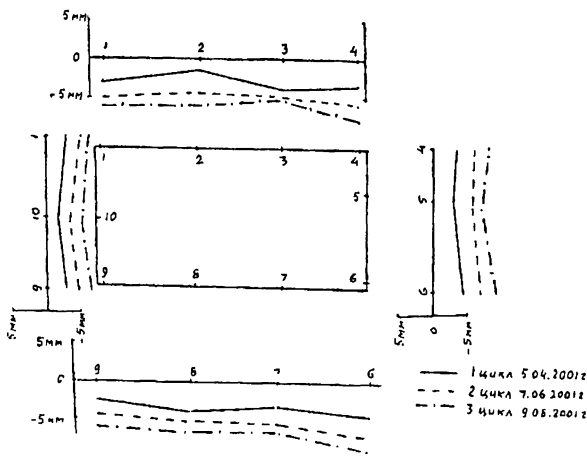


Рис. 1.63. Графическое изображение осадок

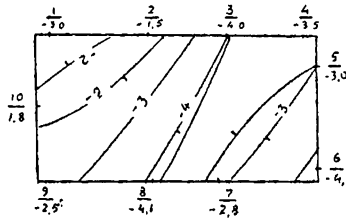


Рис. 1.64. Пространственный график осадок

Результаты наблюдений каждого цикла отражают в краткой пояснительной записке, которая содержит: схему ходов и краткое описание технологии измерений, результаты уравнивания и оценки точности, ведомости отметок и осадок марок, графический материал и краткий анализ полученных результатов.

После окончания работ составляют технический отчет, который является основным документом выполненных работ. В нем содержатся те же сведения, что и в пояснительной записке, но по всем циклам с более подробным анализом и обобщающим выводом.

1.4.19. Цифровое лазерное сканирование

В лазерном локаторе (ЛЛ), помещенном на самолете, в качестве излучателя используют полупроводниковый лазер, работающий в импульсном режиме. При сканировании определяют наклонное расстояние до точки отражения и направление зондирующего луча в системе координат локатора [14].

Для каждой линии визирования (в зависимости от типа ЛЛ) при сканировании может быть получено до пяти отражений нескольких компонентов объекта съемки: от листвы растительности, проводов и опор ЛЭП, кромок зданий, твердой поверхности (крыши зданий, поверхности земли и т. п.).

Трасса носителя фиксируется бортовым приемником GPS. Сочетание полученных данных (показания GPS, наклонная дальность до объекта и направление на него) позволяет определить координаты объекта.

Следует заметить, что все основные компоненты лазерного сканера (дальномерный блок, GPS, инерциальная система) хорошо изучены и активно эксплуатируются. Принципиально новое качество заключается в объединении

названных компонентов в единое целое, названное лазерным локатором, причем все источники информации в ЛЛ сопоставимы по точности (15–20 см в абсолютных координатах).

В качестве обобщенного понятия поставляемых лазерно-локационных данных часто используют термин «лазерно-локационное изображение», который не соответствует традиционному пониманию этого термина. Лазерно-локационное изображение — это множество лазерных точек земной поверхности или другого объекта, от которых отразился зондирующий лазерный луч, каждая такая точка определена пространственными координатами *X, Y, Z*. В совокупности лазерные точки образуют некоторый образ наблюдаемой сцены (в дистанционном зондировании в наиболее общей форме сцена — объект съемки), который и принято называть лазерно-локационным изображением, или «облаком».

Сравнение наземной топографической съемки с данными лазерно-локационной съемки показывает, что плотность пикетов определяется масштабом топографической съемки и характером объекта, производительность съемочной бригады — несколько сотен пикетов в день, точность — примерно 1 см. При лазерно-локационной съемке имеем 3–5 лазерных точек на 1 м^2 земной поверхности, производительность сканера до 50–70 тыс. измерений в секунду, точность — 15–30 см. Точки лазерных отражений покрывают как поверхность земли, так и все наземные объекты — кромки зданий, водоемы, растительность и др. Распределение лазерных точек по поверхности сцены имеет случайный характер, тогда как при топографической съемке положение пикета определяет топограф.

Преимущество ЛЛ метода по сравнению с традиционными методами наземной и воздушной съемки очевидно. Применение ЛЛ, как отмечается в [14], можно условно разделить на две большие группы.

1. «Общетопографические» приложения, в которых ЛЛ решают задачи того или иного традиционного метода съемки, например стереотопографического.
2. Специальные приложения, позволяющие получать принципиально новые виды информации.

На практике эти два вида часто неотделимы друг от друга.

Наземные лазерные сканеры позволяют обеспечить большую плотность и точность лазерных отражений. Наземное лазерное сканирование может являться дополнением воздушному, когда при глобальной съемке территории возникает необходимость в построении моделей объектов, недоступных воздушному сканированию.

Путем наземного лазерного сканирования можно выполнить съемку внутри инженерных сооружений, получить характеристику некоторых объектов, например провисание проводов или трубопроводов между опорами, определить диаметры труб на эстакадах и т. п. Наземное лазерное сканирование можно использовать для съемки фасадов и архитектурных памятников, для получения дистанционно объемных цифровых моделей различных объектов и при повторном сканировании через определенный промежуток времени определять деформацию этих объектов.

1.4.20. Использование фотограмметрических и стереофотограмметрических методов в архитектуре и строительстве

Фотограмметрические методы эффективно применяют при архитектурных обмерах, проектировании, фиксации и контроле промежуточных этапов строительства, съемках построенных зданий и сооружений [20].

Материалы наземной стереофотограмметрической съемки используют для получения планов, профилей, цифровой информации об архитектурных памятниках, зданиях производственных объектов и т. п. Эти же методы применяют для определения различных деформаций, объема сооружения, получения достоверной информации об объектах, недоступных для непосредственных измерений, при определении фактических габаритов строительных деталей, отклонения их поверхностей от плоскости и от вертикального положения. При этом обеспечивается практически одинаковая точность по площади фасада здания, простота и безопасность выполнения работ.

Архитектурные обмеры в настоящее время выполняют в основном фотограмметрическим методом, при этом высокоточную информацию об исследуемом объекте можно получить в графическом (планы, разрезы, сечения), фотографическом (фотопланы, фотографии, фотопанорамы, фотосхемы) или цифровом (цифровая модель объекта) видах.

Наземную стереофотограмметрическую съемку при архитектурных обмерах и определении деформаций сооружений целесообразно выполнять так, чтобы базис B фотографирования располагался параллельно плоскости фасада фотографируемого объекта. При этом отстояние (расстояние от точки фотографирования до объекта) $Y \approx 5B$.

Координаты концов базиса фотографирования и опорных точек на фотографируемом объекте должны определяться в единой системе.

При съемке сооружений на узких улицах применяют как нормальный (базис параллелен фасаду объекта), так и равномерно отклоненные случаи

съемки и съемку с наклоном оси фототеодолита (при съемке высоких сооружений).

Камеральная обработка материалов фотограмметрической съемки заключается в составлении фотопланов плоских объектов по снимкам, предварительно приведенным к заданному масштабу и освобожденным от искажений за наклон снимка и рельеф сфотографированного объекта при помощи фототрансформатора или при обработке снимков аналитическим методом по строгим формулам, позволяющим получать информацию об исследуемом объекте с высокой точностью.

Определение деформаций различных объектов в основном базируется на наземной стереофотограмметрической съемке. Этот метод применяют для определения деформаций грунтов (при сооружении подпорных плотин и дамб, земельного полотна дорог, оседании земной поверхности при разработке полезных ископаемых и т. п.), при определении динамической и статической деформации различных объектов (подкрановых балок, несущих конструкций мостов, тоннелей, зданий), изучении состояния объектов под влиянием различных нагрузок (железнодорожного пути и опор мостов при прохождении по нему состава, зданий и сооружений, построенных на подрабатываемых территориях, резервуаров для нефти, воды в процессе их заполнения), кренов высотных зданий, дымовых труб, опор ЛЭП и т. п.

По сравнению с геодезическими фотограмметрический метод обеспечивает при достаточной точности достоверность, документальность, высокую производительность и экономичность, безопасность измерений бесконтактным путем без остановки производственного процесса. При этом можно определить деформацию неограниченного количества точек в один момент времени.

Фотограмметрический способ определения деформаций основан на использовании стереокомпаратора или другого прибора, в левую кассету которого укладывают фотоснимок, полученный в начале наблюдений, а в правую — снимки, полученные в данном цикле. Снимки ориентируют по координатным меткам и винтами продольных и поперечных параллаксов измеряют смещения Δx_i и Δz_i точек правого снимка относительно левого. Горизонтальная ΔX_i и вертикальная ΔZ_i деформации объекта определяются по формулам:

$$\Delta X_i = \frac{Y}{f}\Delta x_i, \quad \Delta Z_i = \frac{Y}{f}\Delta z_i,$$

где Y — отстояние фототеодолита от наблюдаемого объекта; f — фокусное расстояние объектива фототеодолита.

Точность определения деформаций по этому способу в основном зависит от ошибок измерения Δx_i и Δz_i, средние квадратические погрешности:

$$m_{\Delta X_i} = \frac{Y}{f} m_{\Delta x_i}, \quad m_{\Delta Z_i} = \frac{Y}{f} m_{\Delta z_i}.$$

При $m_{\Delta X_i}$ = 1 мм, $m\Delta_{xi}$ = 0,01 мм, f = 195 мм, максимально допустимое отстояние

$$Y = \frac{m_{\Delta X}}{m_{\Delta x}} f = \frac{1 \text{ мм} \cdot 195 \text{ мм}}{0{,}01 \text{ мм}} = 19{,}5 \text{ м}.$$

Стереофотограмметрический способ применяют при определении деформаций вдоль трех пространственных осей. На стереокомпараторе измеряют продольный параллакс p_i и x_i, и z_i, точек, отмеченных на снимках предыдущей и последующей съемок. По результатам этих измерений определяют деформации сооружения по формулам [20]:

$$\Delta X_i = X_i - X_0 = B\left(\frac{x_i}{p_i} - \frac{x_0}{p_0}\right),$$

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_0 = Bf\left(\frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_0}\right),$$

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_0 = B\left(\frac{z_i}{p_i} - \frac{z_0}{p_0}\right),$$

где f – фокусное расстояние камеры, X_i, Y_i, Z_i, — координаты текущего цикла наблюдений; X_0, Y_0, Z_0 — координаты начального цикла; B — базис фотографирования, параллельный фасаду здания.

Средние квадратические погрешности [20]:

$$m_{\Delta X} = \frac{Y}{f}\sqrt{2m_x^2 + 2\left(\frac{Y}{B}\right)^2\left(\frac{x}{f}\right)^2 m_p^2},$$

$$m_{\Delta Y} = \frac{Y}{f}\sqrt{2\left(\frac{Y}{B}\right)^2 m_p^2},$$

$$m_{\Delta Z} = \frac{Y}{f}\sqrt{2m_z^2 + 2\left(\frac{Y}{B}\right)^2\left(\frac{z}{f}\right)^2 m_p^2}.$$

При Y = 15 м, B = 3 м, f = 195 м, $m_x = m_z$ = 0,01 мм, m_p = 0,005 мм, x = 50 мм, z = 30 мм получим $m_{\Delta X}$ = 1,3 мм, $m_{\Delta Y}$ = 2,8 мм, $m_{\Delta Z}$ = 1,2 мм.

Для повышения точности определения деформаций используют контрольные точки, координаты которых определяют по результатам геодезических наблюдений. При тщательном выполнении работ относительные средние квадратические погрешности определения деформаций стереофотограмметрическим способом равны 1:10 000–1:15 000 от величины отстояния.

Применение фотограмметрии при съемке тоннелей

При съемке тоннелей обычно получают поперечные профили. Наиболее просто их находят методом светового свечения [18]. Световую щель устанавливают вертикально и перпендикулярно к оптической оси фототеодолита, фотографируют. Профили сечений получают на фототрансформаторе. Для масштабирования используют изображение базисной рейки, установленной на осветителе, расстояние между марками рейки известно, на снимке расстояние между изображениями марок измеряют на стереокомпараторе. Расстояния между диаметральными точками профиля получают с погрешностью, не превышающей 1:500–1:1000 диаметра тоннеля.

1.4.21. Инженерно-гидрографические работы

Инженерно-гидрографические работы на реках, озерах и водохранилищах имеют следующие этапы [4]:

- создание планово-высотных геодезических сетей;
- топографические съемки прибрежной суши;
- русловые съемки;
- промеры глубин;
- нивелирование водной поверхности;
- гидрографическое траление;
- обследование подводных препятствий;
- трассирование судовых ходов и съемка створных площадок.

При выполнении русловых съемок и нивелирования водной поверхности высотная опорная сеть закрепляется грунтовыми, скальными и стенными реперами не реже чем через 5 км. На участках перекатов и порогов рек дополнительно устанавливают по два репера.

Высотная опорная сеть при русловых съемках и нивелировании водной поверхности создается нивелированием III класса при уклоне от 0,00002 до 0,00006 (от 2 до 6 см на 1 км реки), нивелированием IV класса при уклоне свыше 0,00006 (свыше 6 см на 1 км реки), техническим нивелированием на озерах и водохранилищах.

Предельные погрешности положения пунктов планового съемочного обоснования при русловых съемках и промеров глубин не должны превышать 0,6 мм в масштабе плана. Ширина береговой полосы от меженной бровки, подлежащая съемке, для масштаба 1:2000–100 м, 1:5000–150 м, 1:10 000–200 м.

Расстояния между галсами и промерными точками в зависимости от подробностей промеров глубин и масштаба плана приведены в таблице 5.13 в работе [4].

Подводный рельеф изображают изобатами (линиями, характеризующими глубину водоема) или горизонталями. Высота сечения рельефа (в зависимости от масштаба и сложности рельефа) 0,5 или 1 м. Галсы при промерах глубин прокладывают по береговым створам, фотогалсам и навигационным приборам маятниковым методом.

Плановое положение точек промера глубин определяют следующими методами:

- без инструментальных засечек движения катера на небольших реках и водоемах при длине галсов до 200 м;
- с инструментальными засечками (по створу и прямыми засечками с берега одним прибором; обратными засечками двумя секстантами; по створу и обратной засечкой одним секстантом);
- разбивкой в натуре примерных точек по размеченному тросу или со льда;
- с применением радиогеодезических и спутниковых геодезических систем на базе автоматизированных гидрографических комплексов, выполняющих все инженерно-гидрографические работы, включая составление рабочего планшета.

Средняя погрешность определения планового положения промерных точек относительно ближайших пунктов съемочного обоснования при инженерно-гидрографических работах на реках, внутренних водоемах и акваториях не должны превышать 1,5 мм в масштабе плана.

Промеры глубин выполняют эхолотом, ручным или механическим лотом, отсчеты производят с точностью до не менее 0,1 м при глубине до 10м, 0,2 м — при глубине 10–20 м и 0,5 м — при глубине свыше 20 м.

Комплекс работ по высотному обоснованию промеров глубин состоит из: установки и нивелирования реперов; устройства водомерных постов и наблюдения за уровнем воды; мгновенной или однодневной связки уровней воды; нивелирования по рабочим уровням воды (одиночные ходы IV класса, опирающиеся на реперы).

При промерах глубин в прибрежной зоне морей погрешность передачи теоретического нуля глубин от постоянного уровенного поста на временный не должна превышать 5 см.

1.4.22. Инженерно-геодезические изыскания в районах развития опасных природных и техноприродных процессов

Согласно [4] к опасным природным и техноприродным процессам относятся склоновые процессы, карст, переработка берегов рек, морей, озер и водохранилищ, подвижка земной поверхности в районах разрывных тектонических смещений (РТС), деформации (смещения, наклоны) земной поверхности на подрабатываемых территориях (при подземном строительстве, откачке подземных вод, нефти, газа и т. п.) и подтопляемых территорий.

Для исследования опасных территорий и техноприродных процессов создают специальные геодезические сети, состоящие из опорных и деформационных пунктов. Оценку исследуемых процессов выполняют по результатам периодических измерений, позволяющим определять изменение координат и высот пунктов.

Результаты наблюдений за развитием опасных природных и техноприродных процессов необходимо заносить в геоинформационную систему (ГИС) поселений или крупных объектов. Геодезическая часть ГИС включает: сведения об имеющихся топографических и других материалах (план, аэро- и космоснимки, результаты стереофотограмметрических и других видов съемок); нанесенные на план границы участка с опасными природными процессами; схему геодезических сетей; сведения о геодезических знаках, заложенных на объекте; результаты геодезических измерений, уравнивания и оценки точности сети; банк геодезических данных и о смещении геодезических знаков; аналитические модели опасных природных и техноприродных процессов, создаваемые по результатам периодических наблюдений, для оценки процессов и их прогноза.

1.4.23. Геодезические работы, связанные с переносом в натуру и привязкой горных выработок, геодезических и других точек

Согласно [4] перенесение в натуру и привязку инженерно-геологических выработок, геофизических, гидрогеологических и других точек наблюдений производят инструментально со средней погрешностью не более 1 мм в масштабе топографического плана, используемого при разработке проектной документации, относительно ближайших пунктов геодезической сети или предметов местности.

«Допускается для разработки предпроектной документации перенесение в натуру выработок (точек) на незастроенной территории глазомерно со средней погрешностью не более 5 мм в масштабе используемого плана» [4].

Средняя погрешность планово-высотной привязки инженерно-геологических выработок и других точек относительно ближайших пунктов опорной и съемочной геодезических сетей должна соответствовать требованиям, приведенным в таблице 5.14 в работе [4] и, колеблется в плане от 0,5 до 1,5 мм в масштабе используемой карты и по высоте от 0,1 до 1,0 м.

Глава 1.5. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1.5.1. Классификация угломерных приборов

Угловые измерения выполняют в различных физико-географических условиях — от Заполярья до субтропиков и тропиков, в различное время года, при температуре воздуха от минус 20 до плюс 50°С, при относительной влажности до 95%. Поэтому угломерные приборы (теодолиты) должны быть приспособлены к транспортировке любым видом транспорта, обеспечивать высокую точность и производительность угловых измерений в трудных и длительных по времени экспедиционных условиях; иметь малые габариты и массу, высокую надежность. Они должны быть удобны и просты в обращении, отсчетные шкалы должны соответствовать зрительным возможностям глаза наблюдателя, конструкция теодолитов должна позволять выполнение поверок и юстировок в полевых условиях.

Теодолиты классифицируют по разным признакам: по области применения (геодезические, астрономические, маркшейдерские и др.), по физической природе носителя информации (механические, оптические, электронные, кодовые и т. п.); по конструкции отсчетного устройства (простые, повторительные, с уровнем при вертикальном круге, с компенсатором и др.), по точности.

По точности теодолиты делятся на: высокоточные, точные и технические. Высокоточные теодолиты позволяют в лабораторных условиях измерять угол одним приемом со средней квадратической ошибкой $m \leq 1''$, точные — с $1'' \leq m \leq 10''$, технические — с $m \geq 10''$. Согласно ГОСТу теодолиты обозначают буквой «Т» и числом, соответствующим средней квадратической ошибке измерения угла одним приемом в лабораторных условиях: Т05, Т1, Т2(Т2А), Т5(Т5Л), Т15К, Т30, Т60, 2Т2, 2Т5, 2Т5К, 3Т2КП, 3Т2КА, 3Т5КП. Буква *А* обозначает теодолит с автоколлимационным окуляром, К — с компенсатором, *П* — труба имеет прямое изображение. Цифрами 2 и 3 перед «Т» обозначают унифицированные теодолиты группы 2Т и 3Т.

Теодолиты Т05, Т1, Т2 имеют двустороннее (по диаметрально противоположным штрихам) отсчитывание по лимбу, а теодолиты Т5, Т15, Т30, Т60 — одностороннее. Все теодолиты, кроме Т60, имеют электроосвещение. В Т1, Т2, Т5 и Т15 оптические центриры встроены в алидаду, в Т30 и Т60 возможно оптическое центрирование через полую вертикальную ось при помощи зрительной трубы.

Разработка теодолитов серии 3Т выполнена с учетом оптимизации оптических и кинематических схем при условии максимальной унификации конструкции узлов и деталей. В серии 3Т использован модульный принцип, при

котором конструкция распадается на несколько отдельных модулей (зрительная труба, вертикальная ось с горизонтальным кругом, отсчетная система вертикального круга, микрометр, колонна с горизонтальной осью), которые можно собирать, юстировать, заменять раздельно.

1.5.2. Оптические теодолиты

На рисунке 1.65 изображены основные плоскости и оси теодолита. *ГГ, ВВ* — следы плоскостей горизонтального и вертикального кругов; *LL, ll, l'l'* — ось цилиндрического накладного уровня, цилиндрического уровня при алидаде горизонтального и вертикального кругов; *vv, hh, pp* — вертикальная ось теодолита, ось вращения зрительной трубы и оси вращения подъемных винтов соответственно; *zz* — визирная ось, проходит через перекрестие сетки нитей и оптический центр объектива.

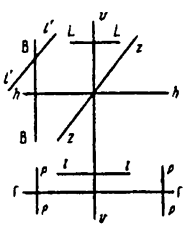


Рис. 1.65. Геометрическая схема высокоточного теодолита

Плоскость горизонтального круга и ось вращения трубы должны быть перпендикулярны к вертикальной оси теодолита. Визирная ось трубы должна быть перпендикулярна к оси вращения трубы. Ось вращения алидады и ось вращения горизонтального круга должны проходить через центр кольца делений лимба. При угловых измерениях вертикальная ось теодолита должна совпадать с отвесной линией в точке его стояния. Нарушения геометрической схемы теодолита приводят к ошибкам в отсчетах и в итоге — к ошибкам в конечных результатах угловых измерений.

В теодолите должны быть согласованы точность изготовления осевой системы, точность нанесения делений, точность визирования, точность изготовления и компоновки узлов отсчетного устройства, точность изготовления цилиндрических уровней, компенсаторов и т. д.

Горизонтальный и вертикальный круги являются главными частями теодолита — угломерного прибора, при помощи которого измеряют горизонтальные и вертикальные углы. На рисунке 1.66 приведена схема теодолита.

В настоящее время горизонтальный и вертикальный круги (лимбы) изготавливают из стекла, на скошенных краях лимбов нанесены деления от 0 до 360°, интервал между делениями обычно равен 5, 10, 20, 30′ или 1° и называется *ценой деления лимба*. Над лимбом помещают вращающуюся вокруг вер-

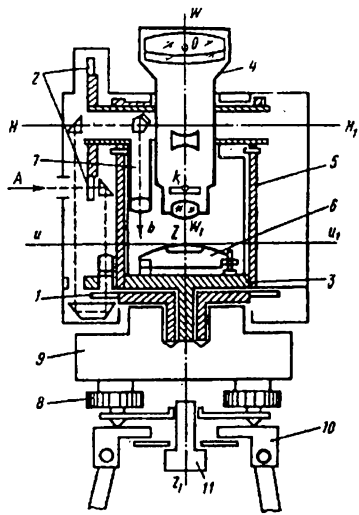


Рис. 1.66. Схема теодолита: 1 — стеклянный горизонтальный круг; 2 — стеклянный вертикальный круг; 3 — алидада; 4 — зрительная труба; 5 — колонка; 6 — цилиндрический уровень; 1 — окулярная часть отсчетного микроскопа; 8 — подъемный винт; 9 — подставка; 10 — головка штатива; 11 — закрепительный винт

тикальной оси верхнюю часть теодолита, состоящую из алидады 3 и зрительной трубы 4 (рис. 1.66) [19]. При вращении зрительной трубы вокруг горизонтальной оси HH_1, установленной на подставке (колонке) 5, образуется вертикальная плоскость, которую называют *коллимационной*. Оси вращения zz_1 алидады и лимба, называемые вертикальной осью прибора, должны совпадать. Для фиксирования отсчета по лимбу на алидаде имеется индекс. Для повышения точности отсчета используют специальные *отсчетные устройства*. Угломерные круги закрывают металлическими кожухами.

Вертикальную ось zz_1 теодолита приводят в отвесное положение, а плоскость лимба — в горизонтальное положение по цилиндрическому уровню 6 с помощью подъемных винтов 8.

Зрительная труба жестко скреплена с лимбом вертикального круга и вращается вокруг горизонтальной оси HH_1, ее поворот на 180° называют переводом трубы через зенит, при этом вертикальный круг, если смотреть от окуляра, относительно зрительной трубы может располагаться справа (круг право *П*) или слева (круг лево *Л*).

Вращающиеся части теодолита имеют закрепительные и наводящие винты, закрепительными винтами фиксируют соответствующую часть в неподвижном положении, а наводящие — плавно вращают при точном наведении перекрестия нитей на визирную цель.

В комплект теодолита входят штатив, буссоль и другие принадлежности. На штатив (тренога с металлической платформой) устанавливают теодолит, который крепят к платформе треноги с помощью станового винта 11. Центрирование, т. е. установку центра лимба на одной отвесной линии с вершиной измеряемого угла, выполняют с помощью отвеса металлического (нить с закрепленным на одном ее конце грузом, второй конец нити закрепляют на вертикальной оси теодолита) или оптического, оптическая ось которого совпадает с вертикальной осью теодолита. Буссоль используют для ориентировки нулевого диаметра лимба по магнитному меридиану.

1.5.3. Основные части геодезических приборов

Лимбы и зрительные трубы теодолита

Лимбы оптических теодолитов изготавливают из оптического стекла, они являются стеклянными дисками, на поверхности которых по окружности через заданный интервал (5, 10, 20′ и т. д.) наносят деления. Стеклянный лимб соосно крепится к металлическому кругу, который устанавливают на ось вращения теодолита (горизонтальный круг) или на ось вращения трубы (вертикальный круг). Информация о делениях лимба передается двумя методами. В теодолитах типа ОТ-02 и Вильд Т-3 идущие от источника света лучи проходят через лимб и отражаются от его верхней поверхности, покрытой амальгамой. В теодолитах типа Т05, Т1, Т2, Т5 световые лучи просвечивают лимб. После прохождения через противоположные концы диаметра световой поток несет изображение противоположных штрихов лимба, которое через оптическую систему поступает в оптический микрометр.

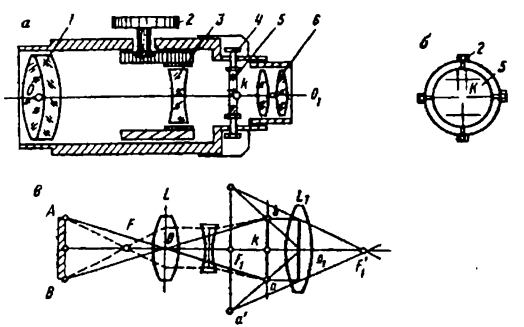
В высокоточных геодезических сетях горизонтальные направления измеряют с ошибкой не более 0,3–0,5″. Эта ошибка является результатом действия

многих факторов, поэтому ошибки ε положения штрихов на лимбе должны быть в 2–3 раза меньше ошибок измерения направлений, т. е. в среднем ε = 0,15″, не превышая предельного значения ε ≈ 0,5″. При радиусе r кольца делений лимба линейное смещение δ штриха относительно его расчетного положения определяют по формуле

$$\delta = \varepsilon r/\rho''.$$

При r = 90 мм (Т05) и ε = 0,5″ находим δ = 0,5″ · 90 мм/206 265″ = 0,2 мкм. Следовательно, нанесение делений лимба высокоточных теодолитов должно выполняться с наивысшей точностью, достигнутой современным приборостроением.

Зрительные трубы (рис. 1.67, *а*) в геодезических приборах используют для наведения на марки и другие визирные цели и для отсчитывания по рейкам. Современные зрительные трубы являются сложными оптико-механическими устройствами и как минимум состоят из объектива, окуляра, фокусирующей линзы и сетки нитей. Как правило, они дают увеличенное обратное изображение. Однако изготавливают трубы, дающие прямое изображение, для



1.67. Схемы зрительной трубы с внутренним фокусированием:
а — устройство; *б* — сетка нитей; *в* — ход лучей; 1 — объектив; 2 — головка фокусирующего устройства; 3 — фокусирующая линза; 4 — исправительные винты сетки; 5 — стеклянная пластинка сетки; 6 — окуляр

чего между окуляром и объективом помещают оборачивающие системы, формирующие совместно с окуляром прямое изображение.

В геодезических приборах в основном используют трубы, состоящие из положительного объектива с большим фокусным расстоянием и положительного короткофокусного окуляра. Объектив создает перевернутое уменьшенное изображение. Так как визирная цель располагается от объектива на расстоянии, значительно превышающем двойное фокусное расстояние, то изображение располагается вблизи заднего фокуса объектива в плоскости сетки нитей, это изображение вместе с сеткой нитей (рис. 1.67, *б*) рассматривается в окуляр, как через лупу (рис. 1.67, *в*).

В астрономических теодолитах используют ломаные трубы с обратным изображением. Обычно применяют трубы с внутренней фокусировкой. Используют также и зеркально-линзовые трубы, например в ДКМ-3. Для невизуальных наблюдений применяют трубы с фотоэлектрической, лазерной, телевизионной и другими системами наведения трубы.

Линию, проходящую через заднюю главную точку объектива и перекрестие сетки нитей, называют *визирной осью*. Точность визирования с помощью зрительной трубы зависит от разрешающей силы трубы, разрешающей способности глаза наблюдателя, контраста цели и фона, на который она проектируется, колебаний изображения, прозрачности атмосферы и т. п.

Разрешающей способностью глаза называют наименьший угол ω, при котором близко расположенные точки еще видны раздельно. В среднем считают $\omega = 60''$. Разрешающая сила зрительной трубы

$$\alpha = \omega/3\Gamma,$$

где Γ — увеличение трубы.

При благоприятных условиях наблюдения средняя квадратическая ошибка визирования

$$m_B \approx \alpha/3 = \omega/9\Gamma.$$

В таблице 12 для различных теодолитов приведены значения Γ, α, m_B.

Сетка нитей теодолита обычно имеет две близкие параллельные нити — биссектор, угловое расстояние между нитями около $35''$. Точность визирования биссектором значительно выше визирования одной нитью.

Окулярный микрометр. Для уменьшения влияния случайных ошибок визирования трубы высокоточных теодолитов имеют окулярные микрометры, состоящие из подвижного биссектора сетки нитей, связанного с отсчетной шкалой микрометра. При наблюдении биссектор не менее трех раз наводят на

Таблица 12

Параметр	Марка теодолита				
	Т05	Т1	Т2	Т5	ОТ-02М
Увеличение трубы Г, крат	36;50;60	30;40	25	27	24;30
Разрешающая сила трубы α, угл.с	1,7;1,2;1,0	2,0;1,5	2,4	2,2	2,5;2,0
Средняя квадратическая ошибка визирования $m_в$, угл.с	0,6;0,4;0,3	0,7;0,5	0,8	0,7	0,8;0,7

визирную цель и в результате определяют среднее значение ε смещения визирной цели (середины биссектора) относительно нуль-пункта биссектора. Выразив ε в угловой мере, определяют поправку в отсчет по лимбу. Применение окулярного микрометра в 1,5–2 раза уменьшает влияние случайных ошибок визирования.

Поверительная труба. Высокоточные теодолиты имеют поверительную трубу с окулярным микрометром. Она крепится к подставке теодолита, используется для учета кручения столика геодезического сигнала при наблюдениях. Перед началом угловых измерений поверительную трубу наводят на расположенную в 1–2 км от пункта визирную цель и закрепительным устройством жестко скрепляют с подставкой теодолита. По разностям отсчетов по поверительной трубе вычисляют поправки в измеренные направления и углы за кручение сигнала. Если кручение не более 1″ за 4–5 минут, то поверительную трубу не применяют.

Фокусирование зрительной трубы позволяет отчетливо видеть изображение наблюдаемых предметов, для чего в современных приборах используют фокусирующую линзу 3 (см. рис. 1.67, *а*), расположенную между объективом 1 и окуляром 6 (зрительные трубы с внутренней фокусировкой имеют постоянную длину). Зрительные трубы с внешней фокусировкой, когда резкость изображения достигается перемещением окулярной части, т. е. изменением длины трубы, как правило, в современных геодезических приборах не используют.

В окулярной части трубы располагают пластину, на которой изображена сетка нитей (см. рис. 1.67, *б*), при фокусировании плоскость изображения предметов местности должна совпадать с плоскостью сетки нитей, только в этом случае резко видны и сетка нитей, и изображения предметов местности, и имеется возможность уверенно навести перекрестие сетки нитей на визирную цель.

Ход лучей в зрительной трубе с внутренней фокусировкой показан на рисунке 1.67, *в*. Совместное действие объектива и фокусирующей линзы соответствует действию одной эквивалентной линзы с фокусным расстоянием

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l},$$

где f_1, f_2 — фокусные расстояния объектива и фокусирующей линзы, l — расстояние между ними.

Подготовку зрительной трубы для наблюдения выполняют путем установки трубы «по глазу» вращением окулярной трубки при визировании на светлый фон до четкого изображения сетки нитей и установки трубы «по предмету» перемещением фокусирующей линзы в трубе с помощью кремальеры до получения четкого изображения наблюдаемого предмета. При этом, как отмечалось, плоскость изображения предмета должна совпадать с плоскостью сетки нитей. Несовпадение изображения предмета с плоскостью сетки нитей называют *параллаксом*, его устраняют более точной установкой «по глазу» и «по предмету». При отсутствии параллакса небольшое перемещение глаза наблюдателя относительно окуляра не вызовет смещения сетки нитей с наблюдаемого предмета.

Увеличением Г трубы называют отношение угла α, под которым изображение предмета видно в трубу, к углу β, под которым предмет виден невооруженным глазом (рис. 1.68, *а*), т. е.

$$\Gamma = \alpha/\beta = f/f_1,$$

где f, f_1 — фокусные расстояния f — объектива, f_1 — окуляра.

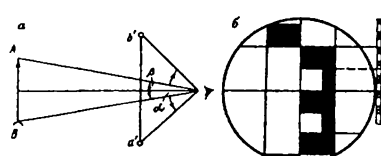


Рис. 1.68. Схемы определения увеличения зрительной трубы

1.5.4. Осевые системы и уровни теодолита

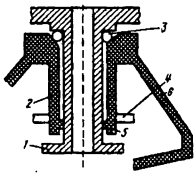


Рис. 1.69. Цилиндрическая ось полукинематического типа с шариковой опорой в теодолитах типа 0Т-02:
1 — ось алидады;
2 — втулка алидады;
3 — шарикоподшипники (опора алидады); 4 — лимб;
5 — ведущий поясок;
6 — подставка

В теодолите основной является вертикальная ось, относительно которой размещают все узлы теодолита согласно геометрической схеме. В современных высокоточных теодолитах Т05, Т1, 0Т-02М (УВК), точных — 2Т, 2Т2А, 2Т5К, 2Т2КП, 3Т2Кд, 3Т5КП и технических теодолитах Т30, 2Т30 применяют цилиндрические оси. В отечественных теодолитах 0Т-02 и теодолитах фирмы «Вильд» впервые применена саморегулирующаяся система: в верхней конической части цилиндрической втулки 2 установлены подшипники 3 с тремя точками соприкосновения, а в нижней — узкий пояс трения скольжения по цилиндру (рис. 1.69). Под действием массы алидады и собственной массы шарики стремятся скатиться по наклонной плоскости, охватывая со всех сторон ось 1, не позволяя ей колебаться при вращении алидады. Для обеспечения высокой устойчивости оси при вращении алидады разность диаметров шариков не должна превышать 0,5 мкм.

В теодолитах типа DKM-3 применяют вертикальную ось с горизонтальным разнесением шариковой опоры — разность диаметров шариков $\Delta D \leq 0{,}2$ мкм (рис. 1.70). Такая конструкция позволяет уменьшить высоту прибора, переместить центр его тяжести вниз и в результате — увеличить устойчивость теодолита. При этом обеспечивается свободное вращение алидады вокруг оси 1 и уменьшается чувствительность системы к измерениям температуры.

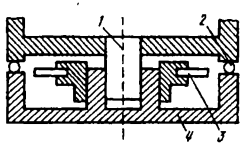


Рис. 1.70. Вертикальная ось теодолита DKM-3 с разнесенной шариковой опорой: 1 — ось алидады;
2 — шарикоподшипник; 3 — лимб; 4 — подставка

Уровни используют для установки линий и плоскостей перпендикулярно или параллельно отвесной линии. Кроме того, уровни можно использовать для измерения малых вертикальных углов. Уровень состоит из ампулы, наполненной жидкостью, оправы для предохранения ампулы и для ее установки на приборе. Уровни бывают круглые и цилиндрические. Внутренняя поверхность круглого уровня является сферической, его осью называют радиус сферической поверхности, проходящей через нуль-пункт.

Ампулы цилиндрических уровней изготавливают из молибденового стекла, которое является более твердым, имеет меньшую шероховатость шлифованной поверхности, на внутренней поверхности ампулы меньше образуется твердых налетов перекисных соединений. Ампулы высокой и средней точности заполняют этиловым наркозным эфиром или его смесью с этиловым ректифицированным спиртом, ампулы низкой точности (τ = 5–10′) — этиловым спиртом. Заполненную горячей жидкостью ампулу запаивают, при остывании жидкости ее объем уменьшается и появляется пузырек с парами жидкости. Внутреннюю поверхность ампулы шлифуют по сферической поверхности. На ампулы наносят штрихи, обычно через 2 мм. Среднюю точку между центральными штрихами называют нуль-пунктом. Касательную к внутренней поверхности ампулы в нуль-пункте называют *осью цилиндрического уровня*.

Радиус кривизны r ампулы зависит от цены деления τ уровня и расстояния Δl между штрихами на ампуле, его определяют по формуле

$$r = (\rho/\tau)\Delta l,$$

где ρ — в угловых секундах.

В геодезических приборах используют ампулы: цилиндрические простые (АЦП) с τ = 10–90″ (рис. 1.71, *а*); компенсированные (АЦК) с τ = 4–40″ (рис. 1.71, *б*); регулируемые (АЦР) (рис. 1.71, *в*). Внутри ампулы АЦК помещают стеклянную палочку, которая уменьшает объем жидкости и величину температурных колебаний длины пузырька. В конце ампулы АЦР имеется камера, в которую при наклоне ампулы перемещается часть пузырька, регулируя таким образом его длину.

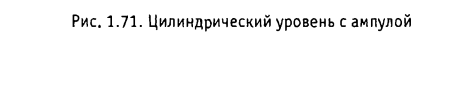


Рис. 1.71. Цилиндрический уровень с ампулой

Минимальный угол наклона уровня, при котором происходит еле заметное смещение пузырька, называют *чувствительностью уровня*, считают, что она равна 0,1τ. При работе в поле уровень (и теодолит) необходимо защищать от солнечных лучей, так как одностороннее нагревание ампулы приводит к сдвигу пузырька к источнику тепла Иногда, например, для подвесного маркшейдерского теодолита, используют *реверсивные ампулы*, имеющие одинаковые шкалы на противоположных поверхностях ампулы.

Исследование уровней выполняют для определения цены деления τ, чувствительности, качества и правильности шлифовки внутренней поверхности. Наиболее точно исследование выполняют на экзаменаторе, состоящем из станины с уровнем, тремя подъемными винтами и горизонтальной осью, вокруг которой вращается пластина, на пластину устанавливают исследуемый уровень. Наклоняя пластину с помощью высокоточного винта, по показаниям отсчетного диска a_i, фиксируют угол наклона $\gamma = (a_2 - a_1)\mu$, где μ — цена деления отсчетного диска. Определив величину n перемещения пузырька уровня по делениям на ампуле, находят цену деления уровня по формуле

$$\tau = \gamma/n = (a_2 - a_1)\mu/n.$$

В полевых условиях цену деления уровня нивелира определяют по рейке: при двух положениях пузырька делают отсчеты l_1 и l_2 по рейке. При известном расстоянии s до рейки

$$\tau = [(l_1 - l_2)/sn]\rho,$$

где ρ — в угловых секундах.

Цену деления уровня при алидаде вертикального уровня можно определить по отсчетам по вертикальному кругу при двух положениях пузырька уровня.

Высокоточные приборы имеют *главный уровень*, относящийся к оси вращения теодолита, и уровень при алидаде вертикального круга. Главный уровень используют для приведения основной оси теодолита в отвесное положение, а при алидаде вертикального круга — для приведения в горизонтальное положение нулевого диаметра вертикального круга.

Для исследования точных уровней применяют способ профессора А. С. Васильева (пулковский астроном и геодезист). Составляют уравнения погрешностей

$$\Delta l = x + (\beta_k - \beta_0)y + p + (t_k - t_0)z - l', \qquad (1.64)$$

в которых x — положение пузырька уровня в момент t_0 и отсчете β_0 по экзаменатору; $y = c''/0{,}5\tau$ — коэффициент для перевода цены c'' деления экзаменатора в полуделения уровня; p — влияние несовершенства шлифовки

ампулы; z — смещение пузырька уровня в единицу времени вследствие изменения внешних условий (температуры и др.); l' — измеренное значение положения уровня в момент времени t_k и отсчете β_k по экзаменатору. Число уравнений равно числу измерений l'. Вероятнейшие значения x, y, p и z определяют из решения уравнений типа (1.64) по методу наименьших квадратов. После этого отсчет l по уровню определяют по формуле

$$l = l' + \Delta l,$$

значение Δl находят по формуле (1.64) с использованием вероятнейших значений x, y, p и z.

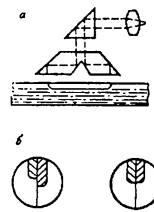


Рис. 1.72. Контактный уронень: *а* — схема действия призменной системы; *б* — изображение концов пузырька цилиндрического уровня в поле зрения окуляра

Уровень устанавливают в нуль-пункт с точностью 0,2–0,3τ. Для более точной установки пузырька в нуль-пункт применяют контактные уровни (рис. 1.72, *а*). Изображение концов пузырька уровня передают в поле зрения окуляра (рис. 1.72, *б*) с помощью системы призм, установленной над уровнем. Пузырек уровня находится в нуль-пункте, когда изображения концов пузырька уровня совпадают. Точность установки контактных уровней в нуль-пункте в 4–5 раз выше, чем в обычных уровнях.

Круглый уровень используют для предварительной установки основной оси прибора в отвесное положение. Ампула круглого уровня является частью сферы (рис. 1.73), помещенной в металлическую оправу, прикрепляемую к прибору, имеется три исправительных винта. Нуль-пунктом круглого уровня является центр концентрических окружностей, нанесенных им на поверхность ампулы. Осью круглого уровня называют нормаль к внутренней поверхности ампулы в нуль-пункте. Цена деления круглого уровня равна 5–20′.

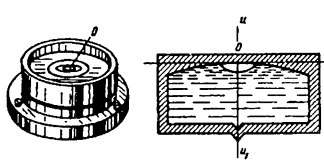


Рис. 1.73. Круглый уровень

1.5.5. Высокоточные теодолиты

Высокоточные теодолиты используют при построении государственных геодезических сетей 1, 2, 3-го классов, выполнении инженерно-геодезических работ особо высокой точности, при решении научных задач и т. п.

Современными высокоточными теодолитами являются Т05 и Т1 (б.СССР), Theo-003(б.ГДР), Т3, Т4 («Вильд Хербругг», Швейцария), КМ-3 («Керн», Швейцария), ТРг («Аскания», б. Западный Берлин) и др.

Теодолит Т05 выпускает ЭОМЗ ЦНИИГАиК с 1969 г. Состоит из двух частей. Верхняя часть содержит зрительную трубу, горизонтальную ось и вертикальный круг; нижняя часть — подставку с подъемными винтами, горизонтальный круг, вертикальную осевую систему, алидаду с колонками, имеющими лагеры, оптическую отсчетную систему горизонтального круга. При перевозке или длительном хранении обе части можно разъединить и поместить в разные упаковочные ящики.

Горизонтальная ось имеет стальные цилиндрические цапфы, которые ложатся на лагеры нижней части теодолита, одна из лагер имеет исправительные винты для устранения неравенства подставок. Зрительная труба — центральная прямая астрономическая с увеличением 62, 50, 37^{x}, имеет окулярный микрометр с ценой деления 1″. Горизонтальный круг может перемещаться для установки нужного отсчета. Отсчетная система основана на совмещении противоположных штрихов лимба с помощью микрометра с оптическими клиньями. Наименьшее деление кругов — 10′.

Отсчет по горизонтальному кругу (рис 1.74) состоит из градусов и минут, кратных пяти, плюс среднее из двух отсчетов по микрометру: 30°15′ + + (3′23,8″ + 3′24,3″)/2 = = 30°18′24,0″.

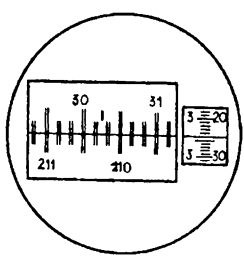


Рис. 1.74. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т05

Теодолит имеет три уровня: накладной с ценой деления $\tau = 4''$, цилиндрический при алидаде горизонтального круга с $\tau = 6–7''$, цилиндрический контактный при алидаде вертикального круга с $\tau = 10–12''$. По заказу потребителя Т05 оснащают поверительной трубой для учета кручения сигнала.

Теодолит Т1 изготавливают серийно с 1976 г., он снабжен окулярным микрометром с ценой деления 1″ для

точного визирования на цель, изображение шкалы микрометра передается в поле зрения трубы. Имеется накладной уровень с ценой деления $\tau = 5''$, уровень при алидаде горизонтального круга с $\tau = 7''$ и при алидаде вертикального круга с $\tau = 12''$.

Зрительная труба прямая центральная астрономическая с увеличением 30 и 40×, переводится через зенит окулярной частью. Отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам выполняются так же, как и в Т05. На рисунке 1.75 отсчет равен $146°20' + (3'07{,}4'' + 3'07{,}6'')/2 = 146°23'07{,}5''$. На базе Т1 выпускают модификации прибора Т1А с автоколлимационной зрительной трубой.

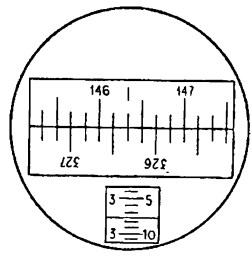


Рис. 1.75. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т1

1.5.6. Точные и технические теодолиты

Точными теодолитами являются Т5, Т5К, 2Т5К, Т2, 2Т2, 3Т2КП, 3Т2КА, 3Т5КП. Теодолит Т5 имеет одностороннюю систему отсчитывания при помощи шкалового микроскопа. За основное положение в Т5 принят вертикальный круг справа. Угол наклона ν вычисляют по формулам

$$\nu = П - МО = МО - Л - 180° = (П - Л - 180°)/2;$$

$$МО = (1/2)(П + Л - 180°),$$

где $П$, $Л$ — отсчеты по вертикальному кругу при его положении справа и слева; $МО$ — место нуля вертикального круга. К отсчетам, меньшим 90°, предварительно прибавляют 360°. Перед отсчетом необходимо совмещать концы пузырька контактного уровня. Теодолит Т5 используют для измерения углов в геодезических построениях 1 и 2-го разряда, при выполнении инженерно-геодезических изысканий. В 1977 г. теодолиты Т5 и Т5К заменены приборами серии 2Т — 2Т5, 2Т5К. В теодолитах 2Т5, как и в других теодолитах унифицированной серии 2Т, за основное принято положение вертикального круга слева. Для вычисления углов наклона используют формулы

$$\nu = Л - МО = МО - П = (Л - П)/2;\ МО = (Л + П)/2.$$

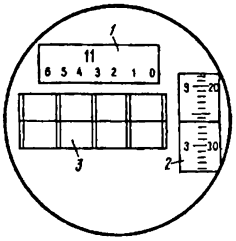


Рис. 1.76. Поле зрения микроскопа теодолита 2Т2

В Т5К имеется оптический компенсатор, принцип действия которого состоит в том, что оптическая деталь или целая оптическая система, закрепленная на пружине или проволоках, под действием собственной массы занимает отвесное положение, компенсируя неточности установки теодолита.

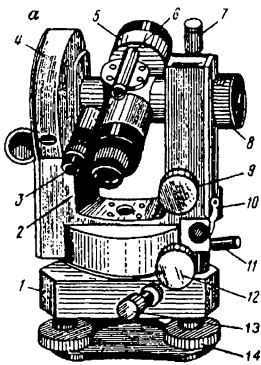
Теодолит Т5К можно использовать вместо нивелира. Для приведения визирной оси в горизонтальное положение наклоном трубы по отсчетному микроскопу устанавливают отсчет, равный МО. Высоту прибора измеряют до красной точки в центре кремальеры. Теодолит Т2 имеет двустороннее отсчитывание по кругам. Его используют в триангуляции и полигонометрии 3 и 4-го классов, а также для угловых измерений в прикладной геодезии, снят, с производства в 1977 г. Взамен Т2 с 1976 г. выпускают теодолит 2Т2, который имеет две модификации: 2Т2А — с автоколлимационной зрительной трубой, 2Т2П — со зрительной трубой прямого изображения.

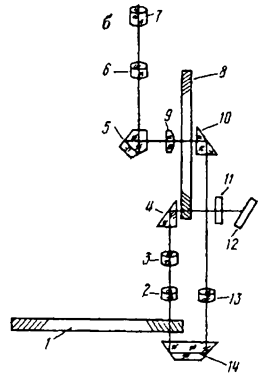
Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита 2Т2 (рис. 1.76) имеет верхнее окно 1 — градусы и под ними десятки минут, боковое 2 — для отсчитывания единиц минут и секунд, центральное 3 — для совмещения противоположных штрихов угломерного круга; на рисунке 1.76 отсчет: 11°43′26,9″.

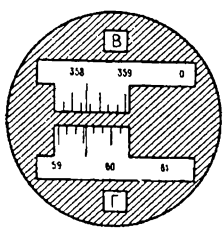
При использовании Т2 для вычисления зенитных расстояний используют формулы

$$z = Л - Mz = Mz - П = (Л - П + 360°)/2;\ Mz = (Л + П)/2.$$

Технические теодолиты предназначены для угловых измерений при прокладке теодолитных и тахеометрических ходов, в съемочных сетях, при инженерных, геологических и линейных изысканиях, при переносе проектов в натуру, при геодезическом обеспечении строительства и т. п. Технические теодолиты обычно имеют небольшие размеры и массу, просты в использовании, снабжены простейшим отсчетным приспособлением — односторонними штриховыми и шкаловыми микроскопами. Этот класс состоит из оптических теодолитов Т15, Т30 (рис. 1.77) Т60 (б.СССР), Theo-020 (б.ГДР), TE-D2 (б.ВНР), теодолиты фирм: «Ниппон» (Япония), «Отто Феннель» (б.ФРГ), «Филотехника» (Италия), «Вильд Хербругг» (Швейцария) и др.







Отсчет по горизонтальному кругу 59°33′

Отсчет по вертикальному кругу 358°16′

Рис. 1.77. Теодолит Т30: *а*. Устройство Т-30:
1 — подставка; 2, 3 — окулярные кольца окуляра и отсчетного микроскопа; 4 — вертикальный круг; 5 — зрительная труба; 6 — визир; 7 — закрепительный винт трубы; 8 — кремальера; 9 — наводящий винт трубы; 10 — цилиндрический уровень; 11, 12 — закрепительный и наводящий винты алидады; 13 — закрепительный винт лимба; 14 — подъемный винт;
б. Оптическая схема Т-30: 1 — горизонтальный круг; 2, 3, 6, 13 — линзы; 4, 10, 14 — призмы; 5 — пситапризма; 7 — окуляр отсчетного микроскопа; 8 — вертикальный круг; 9 — сетка; 11 — матовое стекло; 12 — зеркало

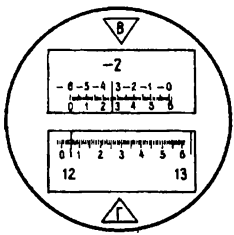


Рис. 1.78. Поле зрения шкалового микроскопа теодолитов с секторной оцифровкой вертикального круга (Т15К, 2Т15, 2Т5, 2Т5К).
Отсчеты: по горизонтальному кругу — 12°05,65′; по вертикальному кругу — 2°34,64′

Теодолит Т15 имеет одностороннюю систему отсчитывания по кругам с передачей изображения штрихов в поле зрения одного шкалового микроскопа (рис. 1.78). Имеется возможность использования Т15 по трехштативному методу. На базе Т15 создан теодолит Т15К со зрительной трубой прямого изображения и компенсатором при вертикальном круге, работающем в диапазоне ±3′ (Т15 и Т15К выпускались с 1973 по 1981 г.).

Теодолиты Т30, 2Т30 имеют одностороннюю отсчетную систему, оценка доли деления круга выполняется на глаз по неподвижному индексу. На рисунке 1.79 отсчеты по горизонтальному кругу: *а* — 70°05′, *б* — 18°02,0′, *в* — 111°37,5′; по вертикальному: *а* — 358°46′, *б* — +1°36,5′, *в* — −0°42,5′.

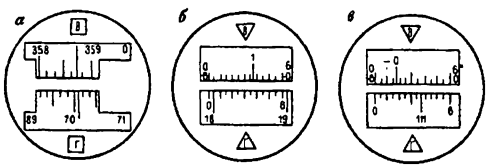


Рис. 1.79. Поле зрения отсчетного устройства теодолита:
а — Т30; *б* — 2Т30 при положительном угле наклона;
в — 2Т30 при отрицательном угле наклона

1.5.7. Электронные теодолиты

В новых высокоточных теодолитах, выпуск которых начат несколько лет назад, используется система отсчета с оптико-электронным сканированием, позволяющая автоматизировать процесс угловых измерений и повысить приборную точность. К таким приборам относится теодолит T2000S фирмы «Вильд Хербругг» (Швейцария) [22]. Зрительная труба в этом теодолите

имеет прямое изображение и увеличение 26, 35, 43 и 59$^{\times}$. Имеется два режима работы: простой — для высокоточных угловых измерений, и следящий — для наблюдения за подвижной целью. Точность отсчета по кругам — 1, или 0,1″ — по усмотрению наблюдателя. Отсчеты выражаются в градусах или гонах (1/400 части окружности).

Теодолит имеет дисплейную панель управления и регистратор. Клавишами задают режим работы теодолита, на экран дисплея выводятся значения измеренных углов. Регистратор хранит записанную информацию, ведет математическую обработку результатов измерений согласно заданной программе. К регистратору можно подключить компьютер. T2000S прост в обращении, надежен и обеспечивает высокую точность измерений (m = 0,5″ без учета влияния внешней среды).

1.5.8. Гироскопический теодолит (гиротеодолит)

Гиротеодолит (рис. 1.80) используют для определения истинных азимутов направлений, в нем угломерный прибор соединен с датчиком направления меридианов. В качестве датчика обычно используют маятниковый гироскоп, который также называют гирокомпасом, указателем меридиана, гиробуссолью. Внутри гирокамеры 4 на тонкой металлической ленточке-торсионе 8 подвешен чувствительный элемент 5 гироскопа. Гироскоп — трехфазный асинхронный двигатель, питается током по двум ленточным токопроводам 2 и торсионам.

Чувствительный элемент 5 помещен в корпус гироблока 7, который скреплен с алидадой угломерной части. При транспортировке прибора чувствительный элемент и корпус гироблока скреплен арретиром 6. При измерении наблюдают в окуляр автоколлиматора 1 на алидаде изображение штрихов его шкалы. Синхронно с движением по азимуту чувствительного

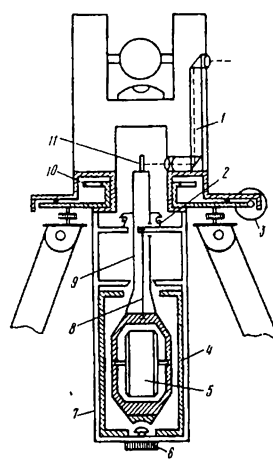


Рис. 1.80. Гиротеодолит

элемента с помощью редуктора 3 поворачивается корпус гироблока, концы токопроводов и верхний зажим ленты, при этом исключается закручивание при движении чувствительного элемента. Для проектирования на горизонтальный круг 10 точек реверсии колебаний чувствительного элемента используют систему, состоящую из автоколлиматора 1 на алидаде и зеркала 11, укрепленного на штанге 9 чувствительного элемента.

В противоположных точках реверсии движение чувствительного элемента прекращается, в момент остановки производят отсчеты по горизонтальному кругу через дополнительный окуляр, по отсчетам определяют значение N, соответствующее положению динамического равновесия чувствительного элемента, при котором главная ось гироскопа совпадает с плоскостью истинного меридиана. После этого перекрестие нитей зрительной трубы наводят на визирную цель, азимут A направления на которую определяют. Значение

$$A = M - N + \Delta,$$

где Δ – приборная поправка гиротеодолита, определяемая по ориентированному направлению с известным азимутом A, т. е. $\Delta = A - (M - N)$.

В геодезических построениях необходимо иметь дирекционные углы α, которые определяют по формуле

$$\alpha = A - \gamma + \Delta A + \delta,$$

где $\Delta A = (\lambda + L)\sin\varphi$ — поправка за переход от астрономического азимута к геодезическому (уравнение Лапласа), λ — астрономическая, а L — геодезическая долгота, φ — широта, γ — гауссово сближение меридианов, δ — поправка за кривизну геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера, вычисляемая в сетях 3, 4-го классов или ниже по точности по формуле

$$\delta_{12} = -\delta_{21} = -f(x_2 - x_1)y_m,$$

где $f = \rho''/2R^2$, для территории СНГ можно принять $f = 0{,}00253$; $y_m = 0{,}5(y_1 + y_2)$ — среднее значение ординаты пунктов: с которого выполняют наблюдение и наблюдаемого. Значение y отсчитывается, как уже отмечалось, от осевого меридиана зоны со знаком плюс к востоку и со знаком минус — к западу от него. Если x_i, y_m, выражать в километрах, то δ получают в угловых секундах. При определении α с точностью 30″ и ниже поправки ΔA и δ не вводят.

1.5.9. Лазерный теодолит

В этом приборе визирная ось воспроизводится узконаправленным пучком света. Лазерные теодолиты целесообразно использовать для разбивочных работ при строительстве дорог, мостов, зданий, сооружений и т. п. В отечественных лазерных теодолитах ЛТ-75 (для больших расстояний), ЛТ-5б (для разбивочных работ на стройплощадках), созданных на базе лазеров ЛГ-75, ЛГ-56, излучатель перекладывается в лагерах.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом выпускают лазерные насадки к теодолитам, при этом ось светового пучка должна совпадать с визирной осью зрительной трубы. Достигается это с помощью призм, направляющих пучок лазерного излучения в окуляр трубы.

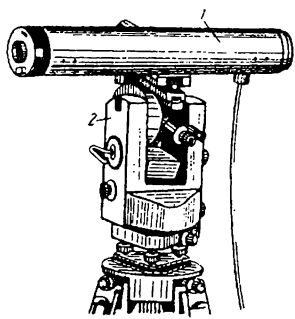


Рис. 1.81. Лазерный теодолит

В лазерном теодолите фирмы «Отто Феннель» (ФРГ) лазер 1 смонтирован на теодолите 2, при этом луч лазера выходит параллельно визирной оси. Лазерные теодолиты выпускают фирмы Великобритании, Бельгии, Франции, Польши и других стран.

1.5.10. Принцип совмещенного отсчета

Для исключения влияния эксцентриситета отсчеты берут по диаметрально противоположным штрихам лимба (по I и II верньерам) и из них находят среднее значение. В оптических теодолитах изображение диаметрально про-

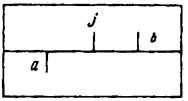


Рис. 1.82. Изображение диаметрально противоположных штрихов лимба

тивоположных штрихов *a* и *b* лимба передается в поле зрения оптического микрометра (рис. 1.82). Для определения по лимбу отсчета *M*, свободно от влияния эксцентриситета, необходимо найти значение «младшего» штриха *a*, измерить расстояние *ab* между изображением диаметрально противоположных штрихов *a* и *b* и половину этого расстояния, выраженного в угловой мере, прибавить к значению «младшего» отсчета, т. е.

$$M = a + ab/2.$$

1.5.11. Поверки и юстировки теодолитов

Поверки позволяют выявить отклонение в приборе от геометрических условий и оптико-механических требований, *юстировкой* наиболее полно устраняют эти отклонения. *Исследования* определяют постоянные прибора, неустранимые отклонения для введения в результаты измерений соответствующих поправок, правильность работ отдельных узлов теодолита, ошибки диаметров лимба и т. п. По результатам исследований выявляют пригодность теодолита для выполнения измерений данного класса точности.

Обязательными поверками на каждом пункте перед наблюдениями являются следующие.

Подъемные и наводящие винты должны вращаться плавно.

Вращение алидады должно быть плавным.

1. *Ось цилиндрического уровня должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения прибора.*

Предварительно плоскость лимба приводят в горизонтальное положение по невыверенному уровню, для чего поворотом алидады устанавливают цилиндрический уровень параллельно линии, соединяющей два подъемных винта, и, вращая их в противоположные стороны, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. Затем алидаду поворачивают на 90° и вращением третьего винта приводят пузырек уровня в нуль-пункт. При этом ось цилиндрического уровня занимает горизонтальное положение *zz*, образуя с осью вращения *vv* прибора угол β (рис. 1.83). К отсчету по горизонтальному кругу прибавляют 180° и полученное значение поворотом алидады устанавливают на горизонтальном круге, т. е. поворачивают алидаду на 180°. При этом ось цилиндрического уровня, сохраняя с осью вращения угол β, занимает положение $z'z'$ и отклоняется от горизонтального положения на угол 2α. На рисунке 1.83, $2\alpha + + 2\beta = 180°$, а $\alpha + \beta = 90°$, т.е. биссектриса $z''z''$ угла 2α

перпендикулярна к оси вращения прибора. Поэтому при юстировке необходимо на половину дуги отклонения привести пузырек уровня к нуль-пункту третьим подъемным винтом, а в нуль-пункте — исправительными винтами уровня.

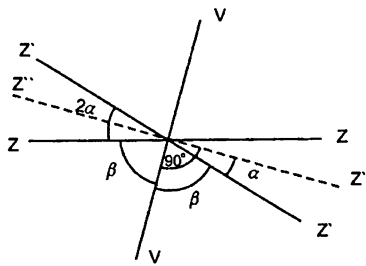


Рис. 1.83. К поверке оси цилиндрического уровня теодолита (первого условия)

Следует заметить, что ошибка в отсчете по горизонтальному кругу из-за невыполнения этого условия, т. е. из-за наклона вертикальной оси теодолита, не исключается при выводе среднего из результатов измерений при круге право и круге лево.

2. *Горизонтальная нить сетки должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения теодолита.*

Вертикальную ось вращения теодолита тщательно устанавливают в отвесное положение, после чего левым краем горизонтальной нити наводят на точку. Вращая наводящим винтом, медленно вращают трубу по азимуту. Если изображение точки не сходит с горизонтальной нити, то условие выполнено. В противном случае снимают защитный колпачок с окулярной части трубы, ослабляют винты, которыми пластина сетки нитей скреплена с корпусом трубы, и поворачивают сетку так, чтобы при перемещении трубы горизонтальная нить не сходила с точки. Эту же юстировку можно выполнить, совмещая вертикальную нить сетки с нитью отвеса, подвешенного в 10–15 м от теодолита.

3. Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси ее вращения (на рис. 1.65 $zz \perp hh$).

При взаимно-перпендикулярном положении осей zz и hh при вращении трубы ось zz образует плоскость, которую называют *коллимационной*. Если угол β между этими осями отличается от 90° на угол c, называемый *коллимационной ошибкой*, то при вращении трубы ось zz образует две конические поверхности, и при наведении на точку A вместо отсчета M (рис. 1.84) получим отсчет

$$M_1 = M + c. \tag{1.65}$$

После перевода трубы через зенит угол β между визирной осью и осью вращения трубы сохраняется, при наведении перекрестия нитей на точку A по горизонтальному кругу получим отсчет

$$M_2 = M - c \pm 180°. \tag{1.66}$$

Складывая левые и правые части формул (1.65) и (1.66), находим

$$M = \frac{M_1 + M_2 \pm 180°}{2} = \frac{Л + П \pm 180°}{2}. \tag{1.67}$$

Следовательно, среднее из отсчетов по горизонтальному лимбу при круге право (П) и круге лево (Л), после изменения суммы на 180°, свободно от влияния коллимационной ошибки.

Вычитая из формулы (1.65) соответствующие части формулы (1.66), имеем

$$c = \frac{M_1 - M_2 \pm 180°}{2} = \frac{Л - П \pm 180°}{2}. \tag{1.68}$$

При более строгом выводе

$$c = \frac{Л - П \pm 180°}{2} \sin Z, \tag{1.69}$$

где Z — зенитное расстояние ($Z = 90° - \nu$, ν — угол наклона).

Если коллимационная ошибка c превышает $2t$, где t — точность отсчитывания по горизонтальному кругу, то выполняют юстировку, для чего на горизонтальном круге наводящим винтом алидады устанавливают отсчет $M = M_2 + c$. При этом перекрестие сетки нитей сойдет с точки A (см. рис. 1.84). Сняв колпачок с окулярной части трубы и ослабив один из вертикальных исправительных винтов, боковыми исправительными винтами перемещают

пластину, на которую нанесена сетка нитей, до совмещения перекрестия нитей с изображением точки *A*. После юстировки поверку повторяют и убеждаются в выполнении условия. Затем винты сетки слегка затягивают и надевают колпачок.

При $z \approx 90°$ величина *c* практически не влияет на разность направлений, измеренных при одном положении круга, т. е. на горизонтальный угол. В горной местности при наблюдении при одном положении круга коллимационная ошибка может исказить горизонтальный угол.

В теодолитах с односторонней системой отсчитывания (Т15, Т30) выполняют две пары наведения на точку *A*: после первого наведения делают отсчеты M_1 и M_2, затем лимб смещают примерно на 90°, визируют точку *A* и берут отсчеты M'_1 и M'_2. Значение

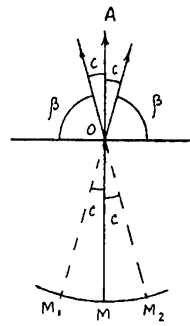


Рис. 1.84. К поверке третьего условия

$$c = 0{,}25\left\{\left[M_1 - (M_2 \pm 180°)\right] + \left[M'_1 - (M'_2 \pm 180°)\right]\right\}. \qquad (1.70)$$

4. *Ось вращения трубы должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения теодолита* (на рис. 1.65 $hh \perp vv$)

При выполнении этого условия при отвесном положении вертикальной оси теодолита, установленном по уровню при алидаде горизонтального круга, визирная ось трубы при вращении образует отвесное положение коллимационной плоскости (на рис. 1.85 плоскость *OAa*). Если условие не выполняется, то при вращении трубы визирная ось образует наклонную плоскость $OA\alpha_1$ при одном положении вертикального круга и OAa_2 — при другом. Для выполнения поверки теодолит устанавливают в 10–20 м от стены, перекрестие сетки нитей при круге право наводят на высоко расположенную точку *A*, закрепляют алидаду, опускают зрительную трубу примерно до горизонтального положения и отмечают на стене точку α_1, на которую проектиру-

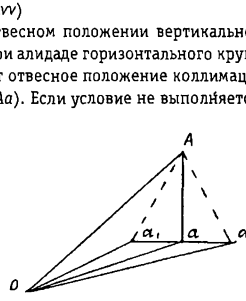


Рис. 1.85. К поверке четвертого условия

ется перекрестие нитей сетки. Затем трубу переводят через зенит и при круге лево наводят на точку *A*, опустив трубу, получают ее проекцию α_2. Если точки α_1 и α_2 совпадут или отрезок $\alpha_1\alpha_2$ не превышает ширину биссектора сетки (15–20″), то условие выполнено. При невыполнении условия юстировку выполняют в специальных мастерских.

Следует заметить, что среднее из отсчетов по горизонтальному кругу при П и Л свободно от влияния этой ошибки.

5. *Компенсатор отсчетной системы вертикального круга должен обеспечивать неизменность отсчета по вертикальному кругу при наклоне оси вращения теодолита на углы до ±3′.*

Теодолит устанавливают на штативе так, чтобы один из подъемных винтов был направлен в сторону наблюдаемой точки *A*. После приведения основной оси прибора в отвесное положение наводят на точку *A* и делают отсчет a_1 по вертикальному кругу. Затем вращением подъемного винта наклоняют теодолит вперед на 2–3 деления уровня, снова наводят на точку *A* и берут отсчет a_2 по вертикальному кругу. После этого наклоняют прибор на 2–3 деления уровня в противоположную сторону, визируют на точку *A* и берут отсчет a_3. Все отсчеты в пределах точности отсчета по микрометру должны совпадать, т. е. $a_1 \approx a_2 \approx a_3$. При невыполнении условия юстировку выполняют в специальной мастерской.

6. *Визирная ось оптического центрира должна совпадать с осью вращения теодолита.*

Вертикальную ось вращения теодолита приводят в отвесное положение, теодолит устанавливают над точкой местности. При вращении алидады изображение точки не должно смещаться с центра оптического центрира более чем на 0,5 радиуса малой окружности. При большем смещении выполняют юстировку.

1.5.12. Измерение горизонтальных углов

Сначала теодолит устанавливают в рабочее положение, т. е. прибор центрируют над вершиной измеряемого угла, приводят ось вращения теодолита в отвесное положение, устанавливают зрительную трубу «по глазу» и «предмету» и готовят отсчетный микроскоп для наблюдений.

Центрирование выполняют при помощи: нитяного отвеса с точностью 3–5 мм, оптического центрира (Т15, Т5 и др.) или зрительной трубы (Т30), направленной объективом вниз, с точностью до 0,5–1 мм. Приближенное центрирование выполняют перемещением штатива, а точное — перемещением теодолита по горизонтальной платформе штатива при открепленном становом винте.

Установка оси вращения теодолита в отвесное положение выполняют путем приведения в нуль-пункт пузырька цилиндрического уровня подъемными винтами. В результате при вращении алидады пузырек уровня не должен отклоняться от нуль-пункта более чем на одно деление уровня.

Установка зрительной трубы «по глазу» и «по предмету» позволяет четко видеть штрихи сетки нитей и наблюдаемый предмет. Штрихи лимба и шкала отсчетного микроскопа также должны иметь четкое изображение.

Измерение отдельного угла

Незакрепленную алидаду отводят влево на 30–40° и обратным вращением наводят на визирную цель первого направления так, чтобы она оказалась справа от биссектора (в поле зрения трубы); алидаду закрепляют. Наводящим винтом алидады, только ввинчиванием, биссектор наводят на визирную цель и берут отсчет по оптическому микрометру (если имеется окулярный микрометр, то трижды наводят его биссектор на визирную цель и берут отсчеты). Открепляют алидаду и наводят на 2-е направление так же, как и на 1-е. На этом заканчивают полуприем.

Трубу переводят через зенит, по часовой стрелке наводят на 2-е направление, предварительно отведя алидаду влево на 30–40°; наводящим винтом биссектор наводят на визирную цель и берут отсчет по оптическому микрометру. По часовой стрелке алидаду поворачивают на угол, дополняющий измеряемый до 360°, наводят на визирную цель 1-го направления, берут отсчет. Заканчивается прием.

Способ круговых приемов — способ Струве

Способ круговых приемов был предложен в 1816 г. В. Я. Струве и получил широкое применение почти во всех странах. В СНГ используют в геодезических сетях 2–4-го классов и сетях более низкой точности. В США его используют и в сетях первого класса.

В этом способе при неподвижном лимбе алидаду вращают по ходу часовой стрелки и биссектор сетки нитей трубы последовательно наводят на первый, второй и т. д., на последний и снова на первый (замыкание горизонта) наблюдаемые пункты, каждый раз отсчитывая по горизонтальному кругу. В этом состоит первый полуприем. Затем трубу переводят через зенит и, вращая алидаду против часовой стрелки, наводят биссектор на те же пункты, но в обратной последовательности: на первый, последний, предпоследний и т. д., второй, первый; заканчивают второй полуприем и первый прием, состоящий из первого и второго полуприемов.

Между приемами лимб переставляют на угол

$$\delta = (180°/m) + i, \qquad (1.71)$$

где m — число приемов, i — цена деления лимба.

Наведение биссектора сетки нитей на визирную цель выполняют только ввинчиванием наводящего винта алидады. Перед каждым полуприемом алидаду вращают по ее движению в данном полуприеме.

В результаты измеренных направлений вводят поправки за рен, наклон вертикальной оси теодолита (при углах наклона визирного луча в 1° и более) и поправки за кручение знака — по отсчетам по окулярному микрометру поверительной трубы.

Контроль угловых измерений: по расхождениям значений первого направления в начале и конце полуприема (незамыкание горизонта), по колебанию двойной коллимационной ошибки $2c = Л - П \pm 180°$, определяемой для каждого направления, и по расхождению приведенных к нулю значений одноименных направлений, полученных в разных приемах. В триангуляции 2–4-го классов незамыкание горизонта и колебание направлений в приемах не должны превышать 5, 6 и 8″ для Т05; Т1; 0Т-02М и Т2; колебание 2c–6, 8 и 12″ для этих же теодолитов соответственно.

На пунктах 2-го класса направления измеряют 12–15 круговыми приемами, на пунктах 3-го класса — 9, на пунктах 4-го класса — 6, а в сетях полигонометрии 2, 3, 4-го классов — 18, 12, 9 приемами.

Уравнивание на станции сводится к вычислению среднего значения по каждому направлению из m приемов. При этом предварительно все измеренные направления приводят к начальному, придав ему значение 0°00′00,00″. Вес уравненного направления, т. е. угла между данным и начальным направлениями, $p = m$ — числу приемов измерений. Для оценки точности направления обычно применяют приближенную формулу Петерса

$$\mu = \frac{1,25}{\sqrt{m(m-1)}} \frac{\sum|v|}{n} = k\frac{\sum|v|}{n},$$

где μ — средняя квадратическая ошибка направления, полученного из одного приема (средняя квадратическая ошибка единицы веса); $\sum|v|$ — сумма абсолютных величин уклонений измеренных направлений от их средних значений, вычисленных по всем направлениям; n, m — число направлений и приемов соответственно. Значения k при m = 6, 9, 12, 15 равны 0,23; 0,15; 0,11; 0,08.

Среднюю квадратическую ошибку уравненного направления (среднего из m приемов) вычисляют по формуле

$$m_н = \mu\sqrt{m}.$$

Достоинства способа круговых приемов: простота программы измерений на станции; значительное ослабление систематических ошибок делений лимба; высокая эффективность при хорошей видимости по всем направлениям.

Недостатки: сравнительно большая продолжительность приема, особенно при большом числе направлений; повышенные требования к качеству геодезических сигналов; необходимость примерно одинаковой видимости по всем направлениям; разбивка направлений на группы при их большом числе на пункте; более высокая точность начального направления.

1.5.13. Измерение горизонтальных углов техническим теодолитом

Теодолит устанавливают в вершине угла B (рис. 1.86) в рабочее положение. Закрепляют лимб и вращением алидады перекрестие нитей сетки наводят на точку A и по горизонтальному кругу берут отсчет a. Затем вращением алидады перекрестие нитей сетки наводят на точку C и берут отсчет c. Угол

$$\beta = c - a.$$

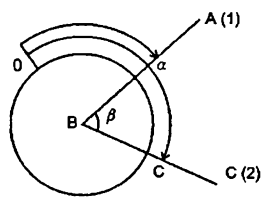


Рис. 1.86. Схема измерения горизонтального угла

Если отсчет c меньше отсчета a, то к отсчету c прибавляют 360°. Отсчеты записывают в журнал (табл. 18).

Для контроля и повышения точности берут два отсчета, выполняя два наведения на визирную цель. Во втором отсчете записывают только минуты и секунды. Из двух значений отсчетов вычисляют среднее значение (записывают минуты и секунды). Вычисляют угол в первом полуприеме (в журнале 81°05′00″).

Следовательно, в первом полуприеме при закрепленном лимбе вращением алидады перекрестие нитей сетки наводят на один из пунктов, делают отсчет по горизонтальному кругу; вращением алидады наводят на второй пункт, делают второй отсчет по горизонтальному кругу. Во втором полуприеме сначала наводят на второй пункт, затем на первый, вращая алидаду в

Таблица 18

Образец журнала измерения горизонтальных углов

Погода: пасмурно, слабый ветер.
Видимость: хорошая.
Дата: 15 июня 2001 г.
Начало: 16 ч. 17 м. Конец: 16 ч. 25 м.

Пункт		Отсчеты								Угол в полуприемах	Среднее значение угла
стояния	наблюдаемый	КЛ				КП					
		°	′	″	среднее	°	′	″	среднее		
2	1	54	11 12	30 00	11′45″	229	42 42	30 00	42′15″	81°05′00″	81°04′52″
	2	135	17 16	00 30	16′45″	310	47 46	30 30	47′00″	81°04′45″	

противоположном первому полуприему направлении. Если горизонтальный угол измеряют одним приемом, то после завершения первого полуприема лимб переставляют на несколько градусов в оптических теодолитах с односторонней системой отсчета и примерно на 90° в теодолитах с металлическими кругами. Два полуприема составляют *полный прием*. Расхождение между углами в полуприемах не должно превышать двойную точность отсчетного устройства (в Т30 — 1′).

Для повышения точности конечного результата часто угол измеряют несколькими приемами. Для ослабления ошибок делений лимба углы в различных приемах измеряют на различных частях лимба, между приемами лимб переставляют на угол, определяемый по формуле (1.71), или на угол

$$\delta = 180°/m,$$

где m — число приемов.

В первом приеме лимб устанавливают так, чтобы при наведении на первый, начальный, пункт отсчет был близок к нулю (несколько больше 0°), во втором приеме начальный отсчет должен быть около δ, в третьем 2δ и т. д. Например, при измерении угла четырьмя приемами ($m = 4$) угол $\delta = 45°$.

Иногда в первом полуприеме лимб ориентируют по магнитному меридиану (для определения склонения магнитной стрелки), для чего на лимбе устанавливают отсчет 0°00′00″, закрепляют алидаду, открепляют лимб и вращают прибор до совмещения северного конца магнитной стрелки установленной на теодолите буссоли с нулевым ее делением.

1.5.14. Влияние на измеренные горизонтальные углы ошибок центрирования прибора и установки визирных целей (вех)

Теодолит устанавливают над точкой B (рис. 1.87) с ошибкой e, т. е. фактически он установлен над точкой B'. Величину e и угол θ, равный углу $BB'A$, называют *линейным* и *угловым элементами центрировки*. Проведя через B' линию $B'A'$, параллельную BA, видим, что при визировании из точки B' на точку A получаем отсчет по лимбу ошибочным на величину c, называемую *поправкой за центрировку*. В треугольнике $BB'A$ по теореме синусов имеем

$$\frac{\sin c}{\sin\theta}=\frac{e}{s},$$

откуда, учитывая малость угла c, находим

$$c=\rho\frac{e}{s}\sin\theta. \qquad (1.72)$$

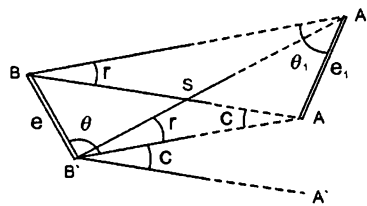


Рис. 1.87. Элементы центрировки и редукции и вызываемые ими поправки

Если визирная цель установлена в точке A_1, то вследствие этого возникает *поправка за редукцию*, величины e_1 и θ_1 называют *линейными* и *угловыми элементами редукции*. В этом случае вместо направления BA получаем направление BA_1. В треугольнике BAA_1 по теореме синусов с учетом малости угла r находим

$$r=\rho\frac{e_1}{s}\sin\theta_1. \qquad (1.73)$$

Ввиду малости величины e можно считать угол $A_1B'A$ равным углу A_1BA. Тогда направление BA изменит свое значение на величину, равную сумме поправок за центрировку и редукцию, т. е. на величину $(c + r)$.

При выполнении высокоточных угловых измерений элементы e, θ центрировки и e_1, θ_1 редукции находят из специальных определений графическим или аналитическим методами, и значения поправок $(c + r)$ вводят в каждое измеренное направление.

При угловых измерениях техническими теодолитами стремятся прибор и визирную цель устанавливать так, чтобы значения c и r не превышали точность угловых измерений. Известно, что ошибка центрирования нитяным отвесом равна 3–5 мм, оптическим отвесом — 0,5–1,0 мм. Формулы (1.72), (1.73) показывают, что при $\theta = \theta_1 = 0$, 180° $c = r = 0$, а при $\theta = \theta_1 = 90°$, 270° получаем максимальные по абсолютной величине значения

$$C_{max} = \rho\frac{e}{s}, \quad r_{max} = \rho\frac{e_1}{s}. \tag{1.74}$$

Формулы (1.72)–(1.74) показывают, что значения c и r возрастают обратно пропорционально расстоянию S.

При $e = e_1 = 5$ мм, $s = 100$ м, r =3438′ находим $c_{max} = r_{max} = \pm 0{,}17'$, при тех же значениях e, e_1 и $s = 50$ м $c_{max} = r_{max} = 0{,}34'$. Следовательно, необходимо стремиться, чтобы стороны измеряемых углов не были короткими, при коротких сторонах необходимо повысить точность центрирования и установки визирных марок (вех) на наблюдаемой точке.

1.5.15. Источники ошибок при угловых измерениях и точность измереиия горизонтального угла техническим теодолитом

Ошибки угловых измерений — случайные и систематические – делят на три группы: личные, приборные и из-за влияния внешней среды. Наиболее трудно устранить систематические ошибки, поэтому их необходимо тщательно изучать и сводить к минимуму путем введения поправок или соответствующей организации измерений. Влияние случайных ошибок ослабляют, увеличивая число приемов измерений до определенной величины.

Личные ошибки измерений возникают из-за несовершенства системы наблюдатель — прибор. К личным можно отнести случайные и систематические ошибки визирования, случайные ошибки совмещения изображений штрихов лимба и отсчитывания по шкале оптического микрометра; систематические

ошибки из-за неодинаковой освещенности штрихов лимба, ошибки отсчета по накладному уровню, позволяющему определять поправки в направлении за наклон вертикальной оси теодолита.

Приборные ошибки возникают из-за неточного изготовления узлов и деталей теодолита, остаточных погрешностей его регулировки и юстировки и т. п. К приборным относят ошибки из-за различия номинальной и фактической цен делений окулярного и отсчетного микрометров, погрешности хода фокусирующей линзы зрительной трубы, эксцентриситет лимба и алидады, ошибки диаметров лимба, коллимационные ошибки, ошибки из-за наклона оси вращения трубы, вертикальной оси теодолита, лимба, ошибки вследствие температурных деформаций узлов теодолита и др.

Ошибки из-за влияния внешней среды являются наиболее существенным источником систематических ошибок при угловых измерениях. В первую очередь к ним относят оптическую рефракцию, которая, если не принять мер по ее учету, лимитирует дальнейшее повышение точности угловых измерений. К этой группе относят ошибки из-за кручения и гнутия геодезических сигналов и др.

При измерении горизонтальных углов теодолитом приборные ошибки обычно исключают из конечного результата путем использования специальной методики. Например, ошибки, возникающие вследствие коллимационной ошибки, неперпендикулярности оси вращения трубы к вертикальной оси вращения теодолита исключаются, если определять среднее из отсчетов при круге лево и право; влияние эксцентриситета исключается при совмещении противоположных штрихов лимба или если вычислять среднее из отсчетов по двум верньерам. Ошибки центрирования и установки визирных целей можно свести к минимуму при достаточной длине сторон и тщательной установкой прибора и визирных целей. Ошибки наведения на визирные цели при увеличении зрительной трубы $20^{\times}$ не превышают 3–4″, при измерении углов техническим теодолитом ими можно пренебречь.

Наиболее существенной является ошибка отсчитывания по лимбу, величина которой $m_0 = t/2$, где t — точность отсчетного устройства. Так как угол в полуприеме $\beta_i = c - a$, то при $m_c = m_a = m_0$

$$m_{\beta_1} = \sqrt{m_c^2 + m_a^2} = m_0\sqrt{2} = \frac{t\sqrt{2}}{2}. \qquad (1.75)$$

Угол в приеме $\beta = 0{,}5(\beta_1 + \beta_2)$, где β_1 и β_2 — значение углов, полученных в первом и втором полуприемах. При $m_{\beta_1} = m_{\beta_2} = m_{\beta_i}$ с учетом (1.75) значение средней квадратической ошибки измерения угла одним приемом

$$m_\beta = \frac{1}{2}\sqrt{m_{\beta_1}^2 + m_{\beta_2}^2} = \frac{m_{\beta_1}}{2}\sqrt{2} = \frac{t}{2},$$

а предельная ошибка

$$\Delta\beta = 3m_\beta = \frac{3}{2}t = 1{,}5t.$$

Разности двух значений угла, полученных в полуприемах,

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2.$$

Средняя квадратическая ошибка этой разности при $m_{\beta_1} = m_{\beta_2} = m_{\beta_1}$ с учетом (1.75)

$$m_{\Delta\beta} = \sqrt{m_{\beta_1}^2 + m_{\beta_2}^2} = m_{\beta_1}\sqrt{2} = t.$$

Предельно допустимое расхождение между значением угла в полуприемах

$$\Delta_{\Delta\beta} = 2m_{\Delta\beta} = 2t.$$

1.5.16. Измерение вертикальных углов. Поверка вертикального круга

Для измерения вертикальных углов используют вертикальный круг теодолита, лимб вертикального круга жестко скреплен с горизонтальной осью трубы и вращается вместе с ней, при этом алидада вертикального круга остается неподвижной. В некоторых теодолитах при алидаде вертикального круга имеется цилиндрический уровень, алидада вместе с уровнем могут вращаться на небольшие углы установочным винтом. Кроме того, цилиндрический уровень можно перемещать относительно алидады исправительными винтами.

При горизонтальном положении визирной оси и оси цилиндрического уровня (пузырек уровня в нуль-пункте) отсчет по вертикальному кругу должен быть равен нулю. Практически это условие часто не выполняется.

Местом нуля (местом зенита) называют отсчет по вертикальному кругу при горизонтальном (вертикальном) положении визирной оси трубы и положении пузырька уровня при алидаде вертикального круга в нуль-пункте. На рисунке 1.88 *МО* — угол между горизонтальной плоскостью и нулевым диаметром вертикального круга. При наведении перекрестия нитей сетки на верх вешки *А* после приведения пузырька уровня при алидаде вертикального круга в нуль-пункт при круге право (КП) по вертикальному кругу берут отсчет *П*, в этом случае угол наклона

$$\nu = П - МО. \qquad (1.76)$$

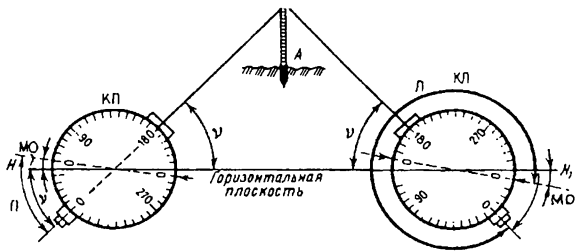


Рис. 1.88. Схема измерения вертикальных углов

При наведении перекрестия нитей сетки на ту же точку при круге лево (КЛ) и приведения пузырька уровня при алидаде вертикального круга в нуль-пункт находим

$$\nu = МО - Л, \tag{1.77}$$

где $Л$ — отсчет по вертикальному кругу при КЛ.

Решая выражения (1.76) и (1.77) относительно $МО$ и ν, получаем

$$МО = (П + Л)/2, \tag{1.78}$$

$$\nu = (П - Л)/2.$$

При вычислении ν и $МО$ по формулам (1.76)–(1.78) к малым углам прибавляют 360°.

В теодолите Т30 оцифровка делений вертикального круга дана против хода часовой стрелки, и отсчет берут по одной стороне круга. При этом для определения ν и $МО$ используют формулы:

$$МО = (П + Л \pm 180°)/2; \tag{1.79}$$

$$\nu = Л - МО = МО - П + 180° = (Л - П + 180°)/2.$$

Например, теодолитом Т30 при наведении на точку получены отсчеты $Л = 3°57'$, $П = 176°05'$. По первой из формул (1.79) находим

$$МО = (3°57' + 176°05' - 180°)/2 = 0°01';$$

по вторым формулам (1.79) имеем:

$$v = Л - МО = 3°57' - 0°01' = 3°56';\ v = МО - П + 180° =$$
$$= 0°01' - 176°05' + 180° = 3°56';\ v = (Л - П + 180°)/2 =$$
$$= (3°57' - 176°05' + 180°)/2 = 3°56'.$$

В теодолитах 2Т30, 2Т15, Т15К, Т5К, 2Т30П, 2Т5 использована секторная оцифровка вертикального круга с указанием знаков «+» и «–», соответствующих положительным и отрицательным углам наклона. Вычисления *МО* и *v* выполняют по формулам:

$$МО = (П + Л)/2;\ v = (Л - П)/2 = Л - МО = МО - П. \qquad (1.80)$$

При измерении вертикальных углов перекрестие нитей сетки или горизонтальную нить сетки вблизи перекрестия наводят на точку, пузырек уровня при алидаде вертикального круга приводят в нуль-пункт, берут отсчет *П*, если вертикальный круг относительно зрительной трубы при наблюдении со стороны окуляра находится справа. Затем трубу переводят через зенит и выполняют описанные действия, берут отсчет *Л*. Угол наклона *v* в зависимости от типа теодолита вычисляют по одной из формул (1.76)–(1.80).

В теодолите Т30 нет уровня при алидаде вертикального круга. Цилиндрический уровень при алидаде горизонтального круга установлен так, что его ось параллельна коллимационной плоскости зрительной трубы. Перед отсчетом по вертикальному кругу пузырек уровня при алидаде горизонтального круга подъемными винтами устанавливают в нуль-пункт.

При измерении вертикальных углов теодолитами, имеющими компенсатор, нулевой диаметр вертикального круга устанавливается в горизонтальное положение автоматически, и после наведения перекрестия нитей на точку примерно через две секунды, в течение которых компенсатор принимает устойчивое положение, берут отсчет. При этом колебания *МО* при измерении различных углов наклона на данной станции не должны превышать $2t$ — двойной точности отсчетного устройства.

Целесообразно, чтобы **МО вертикального круга было равно нулю или близкой к нулю величине**.

Для поверки этого условия определяют *МО* из измерений нескольких вертикальных углов при *КЛ* и *КП*. Если среднее значение *МО* превышает двойную точность отсчета ($2t$), то выполняют юстировку: вращением установочного винта уровня при вертикальном круге устанавливают отсчет, равный *МО*. При этом пузырек уровня, который находился в нуль-пункте, сойдет с него, его возвращают в нуль-пункт исправительными винтами уровня. После отмеченных действий соблюдаются все условия, заложенные в определении места

нуля: установив вращением зрительной трубы и вертикального круга отсчет, равный *МО*, приводим визирную ось в *горизонтальное положение*; устанавливаем *отсчет, равный нулю*, вращением установочного винта уровня; приводим котировочными винтами пузырек уровня в нуль-пункт, т. е. выполняем все условия, определяющие *МО*.

Кроме того, юстировку можно выполнить путем установки на вертикальном круге отсчета, равного углу наклона ν вращением установочного винта уровня. При этом перекрестие нитей сетки должно оставаться на изображении точки, при наведении на которую определяли угол наклона *ν*. После юстировки выполняют контрольное определение *МО*.

В теодолитах с компенсатором для приведения *МО* к величине, близкой нулю, имеется юстировочный винт: для Т15К — в выступе на корпусе прибора под объективом зрительной трубы при ее положении *КЛ*; для Т5К — слева от объектива на колонке вертикального круга при *КЛ*.

1.5.17. Краткие сведения о методах измерения расстояний при помощи электромагнитных волн

В настоящее время линии измеряют в основном электронными приборами — свето- и радиодальномерами, заменившими трудоемкие измерения базисными приборами. Принцип измерения расстояний этими приборами заключается в определении времени и скорости распространения электромагнитных волн (ЭМВ) вдоль трассы измеряемой линии. Расстояние *D* определяется по формуле

$$D = \upsilon\tau/2 + \delta, \tag{1.81}$$

где υ, τ — скорость и время распространения ЭМВ вдоль линии *D* в прямом и обратном направлениях; δ — постоянная приборная поправка. Информацию о времени τ распространения ЭМВ получают с помощью свето- и радиодальномеров, а скорость

$$\upsilon = c/n \tag{1.82}$$

определяют по известной скорости *c* света в вакууме и коэффициенту преломления *n*, который находят по результатам метеорологических измерений. В дальномерах измеряют или непосредственно τ, или величины, функционально связанные с τ. Сущность всех методов измерения расстояний состоит в сравнении одного и того же, связанного с электромагнитным излучением, физического параметра до и после прохождения ЭМВ измеряемой трассы прямо и обратно. Для этого на одном конце измеряемой линии уста-

навливают передатчик и приемник, а на другом — отражатель. Один и тот же сигнал от передатчика направляется по двум путям: непосредственно в приемник и в него же через измеряемую трассу. Первый путь называют опорным каналом, или трактом, а идущий по этому пути сигнал — опорным сигналом. Второй путь создает дистанционный (измерительный) канал, а приходящий от отражателя сигнал называют дистанционным, или измерительным, сигналом. В приемнике опорный и дистанционный сигналы сравниваются по параметру, выбор которого определяет метод измерения расстояния:

1) *временной*, связанный с импульсным излучением и измерением времени прохождения импульсом измеряемой трассы прямо и обратно;
2) *интерференционный*, использующий результаты интерференции опорной и отраженной волн непрерывного излучения без модуляции;
3) *фазовый*, в котором используют непрерывное или импульсное излучение с модуляцией гармоническим сигналом или непрерывное излучение без модуляции; измеряют разности фаз излучаемых и принимаемых колебаний на модулирующей или несущей частоте;
4) *частотный*, в котором применяют непрерывное или импульсное частотно-модулированное излучение, измеряют разности мгновенных частот, излучаемых и принимаемых колебаний.

Наиболее распространенным методом в геодезии является фазовый, позволяющий измерять расстояния от десятков метров до десятков (в радиодиапазоне — до сотен) километров. Практически во всех свето- и радиодальномерах и в большинстве радиогеодезических систем используют фазовый метод. Поэтому рассмотрим этот метод подробнее.

1.5.18. Фазовый метод измерения расстояний. Светодальномеры и радиодальномеры

Передатчик излучает гармонические колебания частоты f, которые проходят трассу D до отражателя и обратно и поступают на приемник со сдвигом фаз $\varphi = 2\pi/\tau = 2\pi f \cdot D/\upsilon$. Подставляя в формулу (1.81) $\tau = \varphi/2\pi f$, имеем

$$D = \frac{\upsilon}{2f}\frac{\varphi}{2\pi} + \delta, \tag{1.83}$$

и сдвиг фаз равен

$$\varphi = 2\pi N + \Delta\varphi, \tag{1.84}$$

где N — целое число фазовых циклов ($\lambda/2$ — фазовый цикл); $\Delta\varphi$ — разность фаз от 0 до 2π, измеряемая фазометром; N определяют по результатам измерения ΔN на двух или нескольких фиксированных частотах. Подставляя φ из (1.84) в (1.83), находим основное уравнение фазовой дальнометрии

$$D = \frac{\upsilon}{2f}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) + \delta = \frac{\lambda}{2}(N + \Delta N) + \delta, \qquad (1.85)$$

где $\lambda = \upsilon/2f$ — длина волны при частоте f; $\Delta N = \Delta\varphi/2\pi$ — дробная часть фазового цикла ($0 < \Delta N < 1$). Входящую в (1.85) f называют масштабной (измерительной) частотой.

Если в дальномере частота колебаний может изменяться плавно, то используют такую частоту, при которой разность фаз между принятым и отправленным сигналами точно равна целому числу фазовых циклов. В этом случае

$$D = \frac{\upsilon}{2f}N + \delta, \qquad (1.86)$$

где N находят из измерений на двух или нескольких частотах.

Согласно ГОСТу 19223-82 в нашей стране в названиях светодальномеров после буквы С — светодальномер — используют индексы: Г — геодезические, Т — топографические, П — для прикладной геодезии. Цифры после буквенного обозначения указывают дальность действия прибора. Например, СТ-5 — светодальномер топографический, измеряющий расстояние до 5 км.

В современных светодальномерах управление, вычисление и контроль выполняются микропроцессором по заданной программе. Измерение расстояний таким светодальномером состоит в установке над пунктами светодальномера и отражателя, наведении светодальномера на отражатель и нажатии кнопки «пуск». Измерения выполняют в течение нескольких секунд.

В фазовом светодальномере (рис. 1.89) световой поток проходит через модулятор, управляемый напряжением от генератора стабильной частоты, на выходе из модулятора он модулирован на амплитуде с частотой, равной частоте генератора. Оптическая система собирает световой поток и направляет его на отражатель, установленный на конце измеряемой линии, от отражателя он поступает на фотоприемник, в котором световая энергия преобразуется в электрическую и после усиления и преобразования поступает на фазометр. На него же поступает сигнал от генератора, т. е. на фазометр поступают два сигнала одинаковой частоты, но различной фазы, разность фаз зависит от длины измеряемой линии.

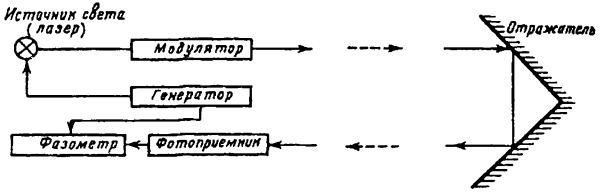


Рис. 1.89. Схема фазового светодальномера

Для контроля и повышения точности в светодальномерах имеется оптическая линия короткого замыкания, используемая как контрольное расстояние. Длина волны масштабной частоты генератора значительно меньше измеряемого расстояния, поэтому разность фаз гораздо больше 360°, а фазометр измеряет величину от 0 до 360°. Возникающую неоднозначность, как уже отмечалось, решают путем измерения расстояния на нескольких частотах генератора стабильной частоты. Точность светодальномеров зависит от стабильности и величины масштабной частоты генератора, точности фазоизмерительного блока, мощности светового потока и других факторов.

В радиодальномерах в качестве несущей частоты используют обычно 3-сантиметровые электромагнитные волны, а вместо используемого в светодальномерах пассивного отражателя — активный ответчик. На концах измеряемой линии устанавливают ведущую и ведомую станции, которые часто делают взаимозаменяемыми. При измерении обе станции работают как активные радиоэлектронные устройства, результат измерения получают на ведущей станции. На этой станции работают два генератора электромагнитных колебаний — несущей частоты $ГМЧ_1$.

На ведомой станции работают три генератора — несущей частоты $ГНЧ_2$, модулирующей частоты $ГМЧ_2$ и поднесущей частоты $ГПЧ_2$. Излучаемые ведущей станцией колебания несущей частоты $\omega_{Н1}$ модулированы колебаниями модулирующей частоты $\omega_{М1}$. Ведомой станцией излучаются колебания несущей частоты $\omega_{Н2}$, модулированные колебаниями модулирующей частоты $\omega_{М2}$ и колебаниями частоты $\omega_{П2}$, в свою очередь модулированные низкочастотными колебаниями частоты $\Omega = \omega_{М_1} - \omega_{М_2}$.

Сигналы низкой частоты получаются в смесителях ведущей и ведомой станций. Разность фаз этих двух низкочастотных сигналов, измеряемая

фазометром, дает информацию об измеряемом расстоянии. Для разрешения неоднозначности используют несколько различных модулирующих частот.

Основные преимущества радиодальномера — возможность измерять большие расстояния и независимость от метеорологических условий. Недостатками являются: необходимость работы одновременно двух станций; возможные ошибки из-за отражения волн от подстилающей поверхности и от зданий и сооружений; большая (2–3 см) постоянная часть погрешности измерения.

1.5.19. Классификация нивелиров

Нивелир позволяет определить превышения горизонтальным визирным лучом, поэтому конструкция нивелира должна обеспечивать горизонтальность луча визирования. Основными деталями нивелира являются: подставка с подъемными винтами и размещенные на алидадной части, имеющей ось вращения, зрительная труба, цилиндрический уровень или компенсатор, круглый уровень.

В зависимости от метода приведения визирной оси в горизонтальное положение имеются два типа нивелиров: с уровнем при зрительной трубе и компенсатором, позволяющим автоматически приводить визирную ось в горизонтальное положение.

Согласно ГОСТ 10528-76 «Нивелиры. Общие технические условия» выпускают три типа нивелиров: высокоточные, точные и технические. В названии нивелира рядом с буквой Н цифрой обозначают допустимую среднюю квадратическую ошибку измерения превышения на 1 км двойного нивелирного хода. Нивелиры с компенсатором в названии имеют букву К, а с лимбом — Л. Все современные нивелиры с уровнями имеют элевационные винты, являются глухими, т. е. труба наглухо скреплена с цилиндрическим уровнем. Нивелиры с компенсатором позволяют увеличить производительность труда примерно на 15–25%.

Компенсаторы классифицируют [1] по *способу компенсации* (с подвижной сеткой, с подвижным объективом, с поворотом и смещением визирного луча); по *средствам компенсации* (оптические, механические, оптико-механические, жидкостные); по *типу демпфера* (воздушные, магнитные); по виду подвески (на подшипниках, на нитях, пружине) и др.

1.5.20. Высокоточные нивелиры

Высокоточные нивелиры используют для нивелирования I и II классов, при нивелировании на геодинамических полигонах и выполнении нивелирования в особо точных инженерных работах. Сумму превышений определяют

со средней квадратической ошибкой 0,5 мм на 1 км двойного хода. Высокоточные нивелиры должны иметь зрительную трубу с увеличением не менее 40$^{\times}$, цилиндрический уровень с ценой деления не более 10″ на 2 мм или компенсатор с чувствительностью 0,2–0,3″, оптический микрометр с ценой деления 0,05 мм, используют нивелирные рейки РН-05, имеющие инварные полосы с основной и дополнительной шкалами с ценой деления 5 мм.

Высокоточный уровенный нивелир Н-05 (рис. 1.90, *а*) удобен в работе, изображение отсчетной шкалы микрометра и концов пузырька уровня передается в поле зрения трубы (рис. 1.90, *б*), для предохранения от неравномерного нагревания солнечными лучами зрительная труба помещена в теплоизоляционный кожух.

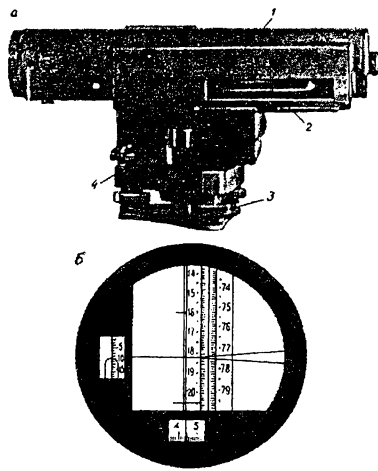


Рис. 1.90. Нивелир Н-05 (*а*): 1 — зрительная труба в термоизолирующем кожухе; 2 — контактный уровень; 3 — подставка нивелира; 4 — установочный уровень; (*б*): поле зрения трубы

Для устранения угла i используют оптический клин, вращающийся вокруг визирной оси трубы и помещенный перед объективом. Оптический микрометр имеет плоскопараллельную пластину, при наклоне которой визирный луч смещается параллельно своему первоначальному направлению, наклон пластины фиксируется перемещением шкалы, изображение которой передается в поле зрения трубы, отсчет делают по неподвижному индексу.

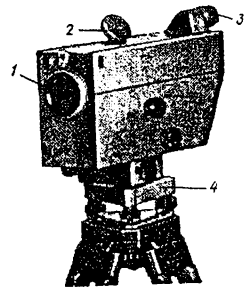


Рис. 1.91. Нивелир с компенсатором Ni-002: 1 — объектив; 2 — зеркало установочного уровня; 3 — окуляр; 4 — подставка нивелира

Нивелир Ni-002 (рис. 1.91, 1.92) выпускают в Германии, он имеет зеркальный компенсатор и прямое изображение в зрительной трубе. Чувствительным элементом компенсатора является двустороннее плоское зеркало, подвешенное в виде маятника в сходящемся пучке лучей, демпфер — воздушный. Поворот зеркала на 180° вокруг вертикальной оси позволяет исключить влияние ошибки за недокомпенсацию в отсчетах по рейке при двух положениях зеркала. Фокусирование зрительной трубы осуществляется перемещением зеркала относительно объектива трубы. Сетка нитей совмещена с объективом, что исключает ошибку за перефокусировку трубы и обеспечивает стабильность угла i, при выпуске нивелира с завода $i \leq 3''$. Изображение шкалы микрометра и ампулы установочного уровня передается в фокальную плоскость окуляра. Измерение долей деления рейки выполняется путем перемещения в вертикальной плоскости объектива с сеткой нитей и наглухо скрепленной с объективом шкалой микрометра. Нивелир Ni-002 при высокой точности позволяет существенно повысить производительность труда, особенно при моторизованном (с использованием автомашины) нивелировании.

В настоящее время изготавливаются цифровые нивелиры (например, DL-101C/102c, фирма Топкон, Япония) для нивелирования I и II класса и аналогичных по точности работ. В комплект входят штрихкодовые рейки, позволяющие автоматически определять расстояния и превышения в цифровом виде, повышают производительность труда на 50%.

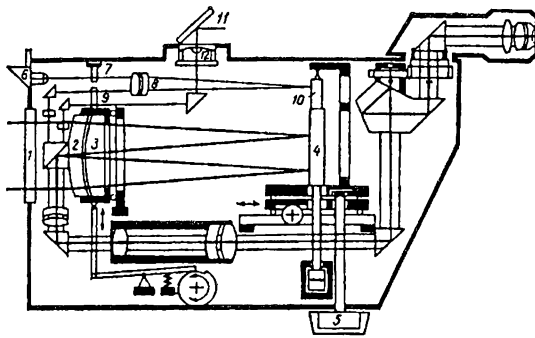


Рис. 1.92. Оптическая схема нивелира с компенсатором Ni-002:
1 — клинообразное защитное стекло; 2 — сетка нитей; 3 — объектив;
4 — зеркало компенсатора; 5 — переключатель компенсатора; 6 — призма подсветки; 7 — жесткий индекс микрометра; 8 — объектив; 9 — шкала оптического микрометра; 10 — зеркало; 11 — зеркало установочного уровня;
12 —установочный уровень

1.5.21. Точные нивелиры

Точные нивелиры используют для нивелирования III и IV классов и других работ, в которых превышение на 1 км двойного хода определяется со средней квадратической ошибкой до 3 мм. В комплект точного нивелира Н-3 входят две шашечные рейки типа РН-3 (по ГОСТу 11158-83) и штатив ШР-120 (по ГОСТу 11897-78).

Точный нивелир Н-3 с уровнем (рис. 1.93) является глухим нивелиром с эвалиционным винтом 3 и контактным уровнем 2, изображение концов пузырька которого передается в поле зрения трубы. Элевационный винт при вращении поворачивает верхнюю часть прибора на небольшие углы вокруг горизонтальной оси. Зрительная труба 1 с внутренней фокусировкой имеет увеличение 30× и даст обратное изображение. Цена деления цилиндрического уровня 15″/2 мм. Верхняя часть нивелира через линейку 4 соединена с осью вращения 5 и может быть закреплена винтом 6. Для точного наведения на визирную цель (рейку) имеется наводящий винт. Для приближенной установки оси вра-

щения нивелира в отвесное положение используют круглый уровень 7. На рисунке 1.94 приведено изображение поля зрения Н-3.

Нивелир Ni-007 с компенсатором (рис. 1.95) предприятия «Карл Цейс Йена» (б. ГДР) имеет форму перископа, используется для нивелирования II, III и IV классов.

Увеличение зрительной трубы — 31,5×, диапазон работы компенсатора 10′, чувствительность компенсатора — 0,15″. Визирный луч (рис. 1.96) проходит через защитное стекло 1, пентапризму 2, объектив 3. Между сеткой нитей 7 и фокусирующей линзой находится компенсатор — подвешенная в точке 9 на металлической ленточке-рычаге прямоугольная призма 6. При наклоне нивелира на малый угол $\alpha < 10'$ визирная ось автоматически устанавливается в горизонтальное положение с точностью от 0,5 до 1″ в зависимости от угла наклона прибора. Пентапризму используют в качестве оптического микрометра. Юстировку угла i выполняют винтами сетки нитей. При нивелировании II класса ввиду сравнительно небольшого увеличения трубы (31,5×) расстояние от нивелира до реек рекомендуют не более 35 м [22].

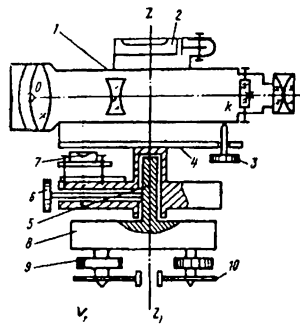


Рис. 1.93. Схема нивелира Н-3 с элевационным винтом

Нивелир Н-3К (рис. 1.97) имеет верхнюю подвижную и нижнюю неподвижную части. Верхняя часть включает зрительную трубу с внутренней фокусировкой, наглухо соединенную с круглой подставкой. Неподвижная часть имеет подставку с подъемными винтами и пружинную пластину с резьбовым отверстием для станового винта. Зрительная труба даст обратное изображение предметов. Оптико-механический компенсатор маятникового типа

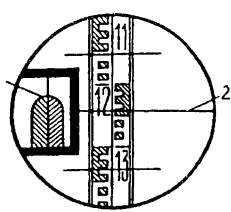


Рис. 1.94. Поле зрения нивелира Н-3:
1 — контакт изображения концов пузырька уровня;
2 — отсчет по средней нити сетки — 1243 мм

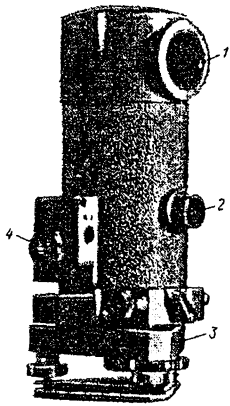


Рис. 1.95. Нивелир с компенсатором Ni-007:
1 — объектив трубы;
2 — головка отсчетного устройства; 3 — подставка нивелира; 4 — окуляр трубы

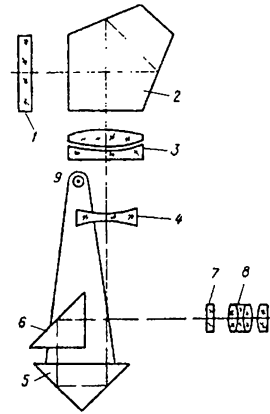


Рис. 1.96. Оптическая схема нивелира Ni-007:
1 — защитное стекло, 2 — пентапризма;
3 и 4 — линзы объектива; 5 — компенсатор;
6 — прямоугольная призма;
7 — сетка нитей; 8 — окуляр;
9 — точка подвеса компенсатора

помещен в сходящемся пучке лучей между фокусирующей линзой и сеткой нитей.

Визирный луч (рис. 1.97, *б*) через объектив 1 и фокусирующую линзу 2 попадает на чувствительный элемент компенсатора — подвижную призму 7, подвешенную на двух скрещивающихся стальных нитях 3, неподвижную призму 6 компенсатора, затем на сетку нитей 4 и в окуляр 5. Колебания компенсатора гасятся воздушным демпфером 8. Угол i юстируют винтами сетки нитей. Нивелир Н-3К выпускают с лимбом (Н-3КЛ) и без лимба. Отсчет по лимбу до 0,1°.

Нивелир $C3_2$ фирмы Sokia (Япония) имеет зрительную трубу прямого изображения с увеличением 22$^{\times}$. Компенсатор подвешен на четырех нитях, имеет диапазон работы ±15′, точность самоустановки линии визирования 0,5″.

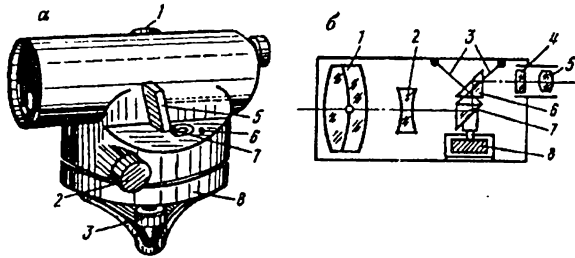


Рис. 1.97. Нивелир Н-3К: *а* — общий вид: 1 — головка фокусирующего устройства; 2 — головка наводящего винта; 3 — подъемный винт; 4 — окуляр; 5 — зеркало круглого уровня; 6 — исправительный винт круглого уровня; 7 — круглый уровень; 8 — подставка; *б* — оптическая схема компенсатора: 1 — объектив; 2 — фокусирующая линза; 3 — нити подвески; 4 — пластина сетки нитей; 5 — окуляр; 6 — неподвижная призма; 7 — подвешенная призма; 8 — успокоитель колебаний

Демпфер — магнитный. Ошибка на 1 км двойного хода — 2,0 мм. Нивелир имеет небольшие размеры, защищен от дождя, случайного попадания влаги и пыли, может работать в любых условиях: защищен от вибрации, ударов и неблагоприятных условий окружающей среды. Наличие сферического оголовка штатива позволяет легко и быстро устанавливать нивелир даже на неровной поверхности. После установки по круглому уровню выполняют измерения. Для наведения на рейку нужно повернуть нивелир и наводящим винтом (имеются наводящие винты с обеих сторон) точно навести на рейку. Минимальное расстояние фокусирования — 0,3 м. Имеется горизонтальный круг с ценой деления 1°.

1.5.22. Технические нивелиры

Технические нивелиры используют для нивелирования IV класса и для технического нивелирования.

Нивелир Н-10 и Н-10Л с уровнем (рис. 1.98) изготовлялся с шаровой пятой и специальным штативом под шифром НТ(Н-10). Нивелир 2Н-10Л — вторая модель с уровнем, эливационным винтом и лимбом на обычной подставке с подъемными винтами. Зрительная труба с внутренней фокусиров-

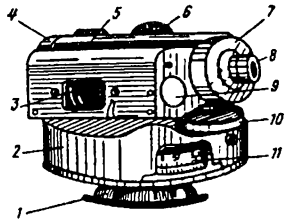


Рис. 1.98. Нивелир Н-10Л (НТ):
1 — шаровая пята; 2 — кожух;
3 — цилиндрический уровень;
4 — объектив; 5 — зрительная труба;
6 — головка фокусирующего устройства;
7 — крышка окулярной трубки;
8 — окуляр; 9 — крышка исправительных винтов цилиндрического уровня;
10 — элевационный винт;
11 — горизонтальный лимб

кой с увеличением 22× и обратным изображением, цилиндрический уровень имеет цену деления 45″/2 мм, цена деления лимба 1°, средняя квадратическая ошибка на 1 км двойного хода 10 мм. В комплект нивелира 2Н-10Л входят шашечные рейки типа РН-10 по ГОСТу 11158-83 и штатив ШР-120 по ГОСТу 11897-78.

Нивелиры с компенсатором Н-10КЛ и 2Н-10КЛ.– Н-10КЛ (рис. 1.99) имеют ломаную зрительную трубу с увеличением 22× без фокусирующей линзы, ее функции выполняет свободно подвешенная прямоугольная призма. Компенсатор маятникового типа, демпфер — воздушный. Неподвижная часть компенсатора — две пентапризмы, скрепленные между собой общим основанием, наглухо установлены в корпусе нивелира. При фокусировании прямоугольная призма перемещается вверх и вниз по салазкам вместе с демпфером, при этом сохраняется неизменность положения визирной оси и не нарушается условие компенсации. Компенсатор прост, надежен и достаточно чувствителен, устойчив к колебаниям температуры и вибрациям. Юстировка угла i выполняется перемещением сетки нитей. В комплект нивелира входят рейки РН-10 с раскраской для прямого изображения и штатив ШР-120.

С 1988 г. нивелир выпускают под шифром 2Н-10КЛ со следующими техническими новшествами [1]: литой кожух уменьшенных размеров, бесконечная передача наводящего винта, арретир и кнопкотолкатель компенсатора, визир на кожухе, удобное окно для наблюдения круглого уровнями др. Метрологические характеристики этого нивелира превосходят соответствующие характеристики Н-10КЛ (например для 2Н-10КЛ $m_{КМ}$ =3,3, а для Н-10КЛ — 8÷9 мм).

Нивелир с компенсатором Ni-025 выпускают в Германии. Оптико-механический компенсатор маятникового типа, чувствительный элемент компенсатора — подвешенные на пружинном шарнире и жестко скрепленные

между собой две призмы, демпфер — воздушный. Зрительная труба с внутренней фокусировкой и прямым изображением. Нивелир изготавливают с горизонтальным кругом и без него, наименьшее деление круга 10′, точность отсчета по индексу 1–2′. Юстировка угла *i* выполняется перемещением сетки нитей. Закрепительный винт отсутствует, наводящий винт с бесконечным приводом имеет головки с двух сторон. В комплект входят две шашечные рейки и раздвижной штатив. При увеличении трубы 25–28× Ni-025 считают точным нивелиром.

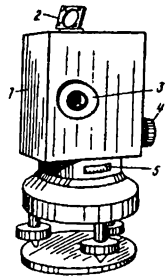


Рис. 1.99. Нивелир Н-10КЛ: 1 — кожух; 2 — зеркало; 3 — окуляр; 4 — наводящий винт; 5 — окно для отсчетов по шкале горизонтального круга

1.5.23. Лазерные нивелиры

Лазерный нивелир НЛ-30 изготавливает Уральский оптико-механический завод, предназначен для измерения превышений, построения горизонтальной и вертикальной плоскостей и контроля точности высотного положения конструкции при инженерно-геодезических работах в строительстве. НЛ-30 можно использовать при геодезических разбивочных работах, при выполнении строительно-монтажных работ: нивелировании по горизонтали полов, потолков, построении опорных и разметочных линий для установки стен, перегородок и т. д. Прибор излучает красный лазерный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Один из лучей, вращаясь, образует лазерную плоскость, которая может быть горизонтальной или вертикальной, другой луч проецирует видимую ортогональную линию.

Средняя квадратическая ошибка измерения превышения на расстоянии 15 м — 2 мм. Дальность — 100 м с приемником и 30 м — без приемника. Нивелир комплектуется детектором для быстрого и точного определения положения лазерной плоскости и специальной нивелирной рейкой.

Лазерный нивелир AS122 (Швейцария). Нивелир позволяет строить горизонтальные плоскости и задавать наклонные плоскости, имеет 100%-ную пыле- и водонепроницаемость, возможно оборудование дистанционным управлением, точность ±10 мм на 100 м и ±1,0 мм на 10 м. Имеется широкий выбор ручных приемников и приемников излучения, устанавливаемых на машины (бульдозер, скрепер и т. д.).

1.5.24. Нивелирные рейки

Согласно ГОСТу 11158-83 выпускают три типа реек: РН-05, РН-3, РН-10.

РН-05 — штриховая трехметровая рейка с инварной полосой, на которую нанесены основная и дополнительная шкалы с делениями 5 мм. НР-05 предназначены для нивелирования I и II классов и высокоточного нивелирования в прикладной геодезии, геодинамике и т. п., их можно использовать и при нивелировании III класса в комплекте с нивелиром N2, Ni-007 и др., имеющими оптические микрометры.

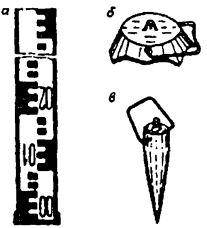


Рис. 1.100. Принадлежности для геометрического нивелирования: *а* — шкаловая рейка; *б* — башмак; *в* — костыль

РН-3, РН-10 — сантиметровые, шашечные, двусторонние, 3- и 4-метровые рейки, изготавливаемые из выдержанного, пропитанного маслом хвойного дерева, цельные или складные. РН-3 используют при нивелировании III и IV классов с нивелирами Н-3, Н-3К и другими равноточными им нивелирами.

Для нивелирования I–IV классов применяют, как правило, цельные трехметровые рейки. Концы реек оковывают, к корпусу рейки прикрепляют ручки и круглые уровни с ценой деления 7÷15′ на 2 мм. При геометрическом нивелировании рейки устанавливают на башмаки или костыли (рис. 1.100). Основные метрологические характеристики нивелирных реек приведены в таблице 22 [1].

Таблица 22

Характеристика	Тип реек		
	РН-05	РН-3	РН-10
Длина рейки, мм	3000	3000	4000
Допустимая разность между средней длиной метра пары реек комплекта, мм	0,15	0,8	1,5
Стрелка прогиба на всю длину рейки, мм не более	3	6	10
Допустимое отклонение от номинального значения длины наименьшего интервала, мм	±0,05	±0,20	±0,5

1.5.25. Исследования и поверки нивелиров с уровнями

Исследования и поверки нивелиров выполняют для определения их пригодности для производства работ, определяют метрологические характеристики и добиваются соблюдения геометрических условий [2].

Перед началом работ проверяют: комплектность прибора, его устойчивость, плавность хода наводящих, элевационных, подъемных винтов, вращения вокруг вертикальной оси, плавность перемещения фокусирующей линзы, чистоту оптики, четкость изображения сетки нитей, концов пузырька уровня и штрихов шкалы микрометра. Элевационный винт устанавливают в среднее положение.

Исследования нивелира

1. Определение увеличения зрительной трубы

1) по рейке с использованием формулы

$$\Gamma = n/N,$$

где n — число делений, видимое невооруженным глазом, в N делениях, видимых в трубу;

2) путем определения измерительной лупой диаметра D входного отверстия и диаметра d выходного зрачка, увеличение

$$\Gamma = D/d.$$

2. Определение угла поля зрения зрительной трубы

1) по рейке определяют отрезок l, видимый в поле зрения трубы по вертикальной нити, и измеряют расстояние S от нивелира до рейки. Значение

$$2w = l\rho/s;$$

2) по горизонтальному кругу, если он имеется, делают отсчеты a и $в$ при наведении краями поля зрения на одну и ту же точку. В этом случае

$$2w = a - в.$$

3. Определение коэффициента дальномера выполняют по формуле

$$C = (S - c)/l,$$

где S – длина базиса, c — постоянная, указанная в паспорте нивелира, l — отрезок по рейке между верхней и нижней дальномерными нитями.

4. Определение цены деления уровня

1) на экзаменаторе (см. п. 1.54) по формуле

$$\tau = \frac{(a_2 - a_1)\mu}{n},$$

где a_1, a_2 — отсчеты по винту экзаменатора до и после перемещения пузырька уровня на n делений, μ — цена деления экзаменатора;

2) по рейке с использованием формулы

$$\tau = \frac{a_2 - a_1}{ns}\rho,$$

где a_1, a_2 — отсчеты по рейке до и после перемещения пузырька уровня на n делений, S = (50 – 60 м) — расстояние от нивелира до рейки.

5. Поверка и юстировка цилиндрического уровня. *Ось цилиндрического уровня должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира.* Выполняется как в теодолите. Если нивелир имеет элевационный винт, то после поворота нивелира на 180° пузырек уровня перемещают на половину дуги отклонения элевационным винтом. Такое положение элевационного винта называют *нормальным отсчетом*. Поверку выполняют в несколько приемов, пока пузырек уровня не будет отклоняться от нуль-пункта более чем на одно деление при любом положении уровня.

6. Поверка и юстировка сетки нитей. Вертикальная нить сетки должна быть параллельна оси вращения нивелира, а горизонтальная — перпендикулярна этой оси. Ось вращения нивелира приводят в отвесное положение. Один конец вертикальной нити совмещают с изображением в трубе нити отвеса, подвешенного в 15–20 м от нивелира в защищенном от ветра месте. Если второй конец нити сетки отходит от нити отвеса более чем на 0,5 мм, то сетку нитей поворачивают до смещения с нитью отвеса. Для проверки горизонтальной нити сетки трубу плавно поворачивают наводящим винтом по азимуту. Если нить сетки сходит с выбранной точки или деления рейки, то сетку нитей нужно заменить. У сетки нитей с клиновым биссектором ось биссектора должна быть перпендикулярна вертикальной нити. Для поверки этого условия точно устанавливают пузырек уровня в нуль-пункт, наводят на хорошо видимую точку, удаленную от нивелира на 6–7 метров, горизонтальную нить сетки (точку *а*, рис. 1.101) и отсчитывают по шкале оптического микрометра — отсчет должен быть близким к 50. Затем наводят на выбранную точку точками *б*, *в*, *г* горизонтальной нити и биссектора и берут отсчеты. Если $[(а + б)/2] - [(в + г)/2] > 2$ делений, то нужно заменить сетку нитей.

7. Поверка и юстировка главного условия. *Проекции визирной оси трубы и оси цилиндрического уровня на горизонтальную и отвесную плоскости должны быть параллельны.* **Первую часть поверки** выполняют при получении новых нивелиров и перед началом полевых работ. Нивелир устанавливают в 50 м от закрепленной рейки так, чтобы линия, соединяющая оси

подъемных винтов 1 и 2, была перпендикулярна визирной оси, а ось винта 3 располагалась в отвесной плоскости. Ось вращения нивелира тщательно приводят в отвесное положение, пузырек уровня устанавливают в нуль-пункт, делают отсчет по рейке. Плавным вращением винтов 1 и 2 на 2–3 полных оборота в разные стороны дают нивелиру боковые наклоны в одну, затем в другую сторону, при этом отсчет по рейке не должен измениться. Если в обоих случаях пузырек уровня остается в нуль-пункте или перемещается в одну сторону, то уровень установлен правильно, если же в разные стороны более чем на 1–2 деления уровня, то положение цилиндрического уровня исправляют его боковыми исправительными винтами.

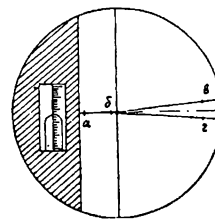


Рис. 1.101. Исследование сетки нитей

Вторую часть поверки выполняют двойным нивелированием. На расстоянии 48 м выбирают на ровной местности две устойчивые по высоте точки, на которые устанавливают по уровню и закрепляют рейки 1 и 2, чтобы при выполнении поверки они оставались неподвижными. Нивелир устанавливают примерно в створе реек на расстоянии 7 м от рейки 1, приводят пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт, наводят на рейку 1 и берут отсчеты $З_{01}$ и $З_{Д1}$ по обеим шкалам, затем наводят на рейку 2 и берут отсчеты $П_{01}$ и $П_{Д1}$ (рис. 1.102). На ст. 2, расположенной в створе реек на расстоянии 7 м от рейки 2, берут отсчеты $З_{02}$ и $З_{Д2}$, затем $П_{02}$ и $П_{Д2}$. Наблюдения на обеих станциях составляют один прием. Определяют превышения

$$h_1 = 0{,}5(З_{01} - П_{01} + З_{Д1} - П_{Д1});$$

$$h_2 = 0{,}5(З_{02} - П_{02} + З_{Д2} - П_{Д2}).$$

Угол i'' определяют по формуле

$$i = \frac{h_1 - h_2}{2(D_2 - D_1)}\rho''.$$

При $D_1 = 7$ м, $D_2 = 41$ м, $\rho'' = 206\,265''$;

$$i'' = 3(h_1 - h_2),$$

где i'' — в угловых секундах, $(h_1 - h_2)$ — в мм.

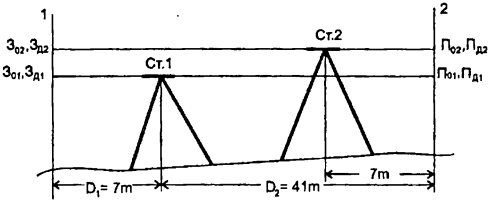


Рис. 1.102. Поверка главного условия нивелира

Если в первом приеме $i'' < 10''$, то выполняют еще два приема. За окончательное принимают среднее из трех значений i''. Если $i'' > 10''$, то его уменьшают, в зависимости от конструкции нивелира, исправительными винтами уровня или исправительными винтами сетки нитей, или поворотом оптического клина перед объективом трубы. В первом случае элевационным винтом трубы устанавливают отсчет $З'_{02} = З_{02} + \frac{D_2 i''}{\rho''} = З_{02} + 0{,}20 \cdot 10^{-2} i''$ по задней, дальней рейке и исправительными винтами уровня устанавливают его в нуль-пункт. Во втором и третьем случаях перекрестие сетки нитей устанавливают на отсчет $З'_{02}$ исправительными винтами сетки или поворотом оптического клина, при этом пузырек уровня должен находиться в нуль-пункте. После исправления i'' окончательное его значение определяют тремя приемами.

Для точных и технических нивелиров поверка главного условия может быть выполнена двойным нивелированием вперед. На ровной местности на расстоянии 40–50 м в точках A и B забивают колышки. Нивелир устанавливают окуляром над точкой A, а на точку B ставят рейку (рис. 1.103, *а*). Приводят пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт (в контактном уровне совмещают концы пузырька уровня), измеряют высоту прибора i_1 — расстояние по отвесной линии от колышка до середины окуляра. Делают по рейке отсчет $П$ по средней нити вблизи перекрестия нитей. На рисунке 1.103, *а* имеем

$$h = i_1 - (П - x).$$

Меняют нивелир и рейку местами и выполняют те же действия. Превышение (рис. 1.103, *б*)

$$h = З - x - i_2.$$

Приравнивая правые части полученных формул в результате находим

$$x = \frac{З + П}{2} - \frac{i_1 + i_2}{2},$$

т. е. величина ошибки x равна разности между полусуммой отсчетов по рейкам и полусуммой высот прибора. Если x меньше установленной инструкцией величины δ (обычно 4 мм), то условие считается выполненным. Если $x \geq \delta$, то выполняют юстировку, для чего вращением элевационного винта на рейке в точке A устанавливают отсчет $З_0 = З - x$. Пузырек уровня сойдет с нуль-пункта, и его приводят в нуль-пункт (восстанавливают контакт концов пузырька

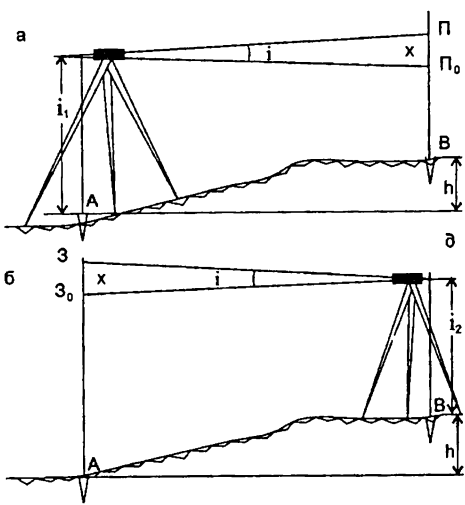


Рис. 1.103. Схема поверки главного геометрического условия нивелира

уровня) исправительными винтами цилиндрического уровня. Для контроля поверку повторяют при других горизонтах прибора.

8. Поверка и юстировка круглого уровня. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира. Установив элевационный винт на нормальный отсчет, с помощью выверенного цилиндрического уровня устанавливают ось вращения нивелира в отвесное положение. Если пузырек круглого уровня не в нуль-пункте, то его приводят в нуль-пункт исправительными винтами круглого уровня.

9. Исследование хода фокусирующей линзы. При изменении фокусировки трубы ее визирная ось должна сохранять неизменное положение. На ровной местности разбивают окружность радиусом 50 м и закрепляют на ней (забивают костыли) точки 1, 2, 3, ..., 8 (рис. 1.104). Эти точки нивелируют со станции *С* — при одинаковом расстоянии от нивелира до реек, и со станции *А* — при разных расстояниях. По разности высот одних и тех же точек судят о влиянии фокусирующей линзы на положение визирной оси.

10. Исследование работы механизма, наклоняющего плоскопараллельную пластинку, и определение цены деления оптического микрометра выполняют в лабораторных условиях после получения нового нивелира с завода, после ремонта нивелира и периодически раз в год. В результате получают: 1) среднее значение цены деления оптического микрометра для расстояний и температур, при которых будет выполняться нивелирование; 2) зависимость цены деления от расстояния до рейки, от изменения температуры воздуха; 3) значение цены деления шкалы микрометра при разных углах наклона плоскопараллельной пластинки; 4) качество работы механизма, наклоняющего плоскопараллельную пластинку. Для исследования применяют шкалу из тонких штрихов с расстоянием между осями которых 0,5–0,7 мм. Шкалу компарируют на микроскопе со средней квадратической ошибкой 5 мкм. Полное исследование состоит из шести приемов, в приеме наблюдают 5–9 штрихов шкалы в прямом и обратном ходах. У хороших нивелиров отклонение средних значений от номинального 0,0500 мм, не превышает 0,0025 мм.

1.5.26. Поверки и юстировки нивелиров с компенсатором

1. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира.

2. Горизонтальная нить сетки должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира. Обе эти поверки выполняют так же, как и для нивелиров с уровнем.

3. Исследование диапазона действия компенсатора, т. е. угла наклона нивелира, в пределах которого работает маятник компенсатора. Его определяют при помощи рейки или коллиматора для продольных $\pm\alpha_k$ и боковых $\pm\beta_k$ наклонов нивелира. Предварительно поверяют и юстируют круглый уровень. При помощи экзаменатора наклоняют нивелир в продольном и поперечном направлениях в обе стороны от нуль-пункта уровня до момента зависания маятника компенсатора, определяемого резким изменением отсчетов по рейке или коллиматору — сетка нитей при наклоне нивелира начинает перемещаться. Значения α_k и β_k определяют по показаниям шкалы винта экзаменатора.

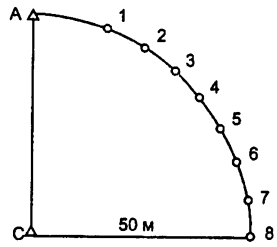


Рис. 1.104. Схема размещения нивелира и рейки

4. Визирная ось зрительной трубы должна быть горизонтальной при наклонах нивелира в пределах работы компенсатора. Для нивелиров, у которых высота прибора равна расстоянию от колышка до середины окуляра, поверку выполняют так же, как и для нивелиров с уровнем (поверка главного условия).

Для нивелиров с перископической трубой поверку выполняют следующим методом. Нивелир устанавливают точно посередине между рейками P_1 и P_2. Даже при наличии угла i в этом случае получаем превышение

$$h = a_0 - b_0 = a_1 - b_1,$$

свободное от влияния ошибки x. Затем нивелир устанавливают за передней рейкой P_2 в точке C на расстоянии D_1 наименьшего визирования, т. е. $D_1 \approx 2$–3 м. Делают отсчет b'_2 по рейке, который практически будет мало отличаться от отсчета b_2 при горизонтальном положении визирной оси, т. е. можно считать $b_2 \approx b'_2$. По рейке P_1 предвычисленный отсчет

$$a_2 = b_2 + h.$$

Если действительный отсчет a'_2 будет равен значению a_2 или $|a'_2 - a_2| \le \delta$, где δ — допуск, установленный нормативными документами (обычно $\delta = 4$–5 мм), то условие выполнено. В противном случае выполняют юстировку

путем перемещения сетки нитей ее вертикальными исправительными винтами так, чтобы по рейке P_1 был отсчет a_2. Для контроля поверку повторяют при новых горизонтах прибора.

1.5.27. Исследование и компарирование нивелирных реек

1. Исследование коробления рейки. Ось шкалы рейки должна быть прямой. Линейкой с миллиметровыми делениями измеряют стрелку прогиба относительно натянутой струны во взаимно перпендикулярных плоскостях корпуса рейки. Для реек без подпятников стрелка прогиба не должна превышать: 1 мм — для реек, используемых при нивелировании I класса, 2 мм — для II класса, 4 мм — для III класса, 7 мм — для IV класса и 15 мм — для технического нивелирования. Если стрелка прогиба больше указанных величин, то рейку нельзя использовать для работы.

2. Линия, соединяющая точку *B* крепления и точку *C* центрирования отвеса, должна быть параллельна осям шкал реек. У реек, используемых для нивелирования I–IV классов и для высокоточного инженерно-геодезического нивелирования, точки *B* и *C* располагаются вблизи верхнего и нижнего концов рейки. Исследование параллельности линии *AB* осям шкал рейки выполняют хорошо выверенным теодолитом при двух положениях рейки: 1) рейка повернута к теодолиту лицевой и 2) — боковой гранями.

3. Ось круглого уровня на рейке должна быть параллельна осям шкал рейки. Поверку и юстировку круглого уровня выполняют при помощи отвеса: точно совмещают острие отвеса с острием центрира *C*, исправительными винтами круглого уровня приводят его пузырек в нуль-пункт.

4. Пятка рейки должна быть перпендикулярна к осям шкал рейки; разность высот идентичных точек пары реек должна быть равна нулю. В 5–6 м от нивелира на штырь с полусферической головкой по отвесу устанавливают рейку сначала в средней, а затем в шести точках по контуру пятки, каждый раз делая отсчеты по обеим шкалам рейки. Не изменяя положения нивелира, устанавливают на штырь вторую рейку рабочей пары, исследование выполняют аналогично первой рейке. Выполняют не менее трех таких определений, перед каждым определением изменяют горизонт прибора. По полученным результатам вычисляют среднее значение перекоса каждой пятки и разность высот идентичных точек пары реек.

5. Определение разности высот нулей черной и красной шкал шашечных реек. На расстоянии до 10 м от нивелира на прочно забитый в землю костыль устанавливают по выверенному уровню рейку, отсчитывают по черной и красной ее сторонам. Вычитая из отсчета по красной сто-

роне отсчет по черной, находят разность нулей красной и черной шкал. Таких определений делают не менее трех, перед каждым определением изменяют горизонт прибора. За окончательный результат принимают среднее из всех определений.

6. Точное определение длины метровых интервалов шкал и вычисление средней длины рабочего метра пары штриховых реек. Определение выполняют на компараторе до начала полевых работ. Рейки укладывают горизонтально на две опоры под делениями 10 и 50. Определяют длины метровых интервалов между осями штрихов 10–30, 30–50 полудециметров основной и 70–90, 90–110 полудециметров дополнительной шкал реек. По этим данным вычисляют среднюю длину рабочего метра реек и поправочный коэффициент, на который умножают среднее значение измеренного превышения. Средняя квадратическая ошибка измеренного метрового интервала инварной рейки на компараторе равна 10 мкм. В полевых условиях измерения метровых интервалов выполняют контрольной линейкой не реже одного раза в месяц.

Шашечные рейки компарируют контрольной линейкой, длина которой должна быть известна с предельной ошибкой не более 0,015 мм.

Допустимая разность между средней длиной метра пары реек комплекта для РН-05, РН-3, РН-10 равна 0,15; 0,8 и 1,5 мм соответственно.

7. Поверка правильности нанесения дециметровых делений шкал реек. Дециметровые деления измеряют контрольной линейкой. Случайная ошибка дециметровых делений не должна превышать 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 мм для нивелирования I, II, III, IV классов соответственно.

1.5.28. Номограммные тахеометры

Появление современных номограммных приборов освободило от необходимости вычислять горизонтальные проложения и превышения в полевых условиях, что повысило производительность труда примерно в 2 раза и облегчило труд исполнителя. В настоящее время использование современной вычислительной техники и электронных тахеометров не повлияло заметно на широкое применение номограммных тахеометров при тахеометрической съемке в связи с их экономической целесообразностью.

Идея создания номограммы, т. е. переменного расстояния между нитями сетки, принадлежит итальянским инженерам Ронкагли и Урбани (1880 г.). Более полно эта идея использована Ф. Гаммером (1896 г.). Технологическое решение, позволившее серийно изготавливать номограммные приборы, было получено фирмой К. Цейсс, выпустившей номограммные тахеометры Дельта (1942 г.) и Дельта-020 (1948 г.) [1].

В номограммном тахеометре горизонтальное положение S и превышение h (рис. 1.105) определяют по формулам

$$S = K_s l_s,\ h = K_h l_h, \tag{1.87}$$

где K_s, K_h — коэффициенты (K_s = 100, K_h = ±10, ±20, ±100/; l_s, l_h — отрезки на вертикальной рейке между основной кривой (на рис. 1.105, а точка 0 на высоте $\upsilon = i$:) и кривыми горизонтальных проложений (точка N) и превышений (точка M) соответственно при наведении на ось рейки вертикальной нити сетки.

На рисунке 1.105

$$S = D\cos\nu,\ h = D\sin\nu. \tag{1.88}$$

В треугольниках JON и JOM по теореме синусов имеем

$$D = \frac{l_s \sin\left[90° - (\varepsilon_s \pm \nu)\right]}{\sin\varepsilon_s} = \frac{l_s \cos(\varepsilon_s \pm \nu)}{\sin\varepsilon_s};$$
$$D = \frac{l_h \sin\left[90° - (\varepsilon_h \pm \nu)\right]}{\sin\varepsilon_h} = \frac{l_h \cos(\varepsilon_h \pm \nu)}{\sin\varepsilon_h}, \tag{1.89}$$

где ε_s, ε_h — параллактические углы дальномера и высотомера.

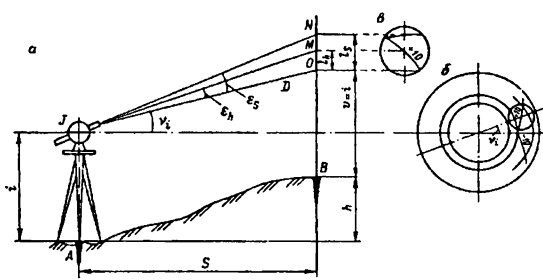


Рис. 1.105. Принцип определения превышений и горизонтальных проложений по номограмме

Из формул (1.87) с учетом формул (1.88), (1.89) находим

$$K_S = \frac{S}{l_S} = \frac{D\cos\nu}{l_S} = \frac{\cos(\varepsilon_S \pm \nu)\cos\nu}{\sin\varepsilon_S} = \frac{\cos\varepsilon_S \cos^2\nu \mp \sin\nu\cos\nu\sin\varepsilon_S}{\sin\varepsilon_S};$$
$$K_h = \frac{h}{l_h} = \frac{D\sin\nu}{l_h} = \frac{\cos(\varepsilon_h \pm \nu)\sin\nu}{\sin\varepsilon_h} = \frac{\cos\varepsilon_h \sin\nu\cos\nu \mp \sin\varepsilon_h \sin^2\nu}{\sin\varepsilon_h}. \quad (1.90)$$

В нитяных дальномерах

$$ctg\varepsilon_S = \frac{f}{p_S}; \quad ctg\varepsilon_h = \frac{f}{p_h},$$

где f — фокусное расстояние, p_S, p_h — отрезки на сетке между основной окружностью и кривыми s и h соответственно. С учетом этих формул вместо (1.90) получаем

$$K_s = \frac{f}{p_s}\cos^2\nu \mp \sin\nu\cos\nu;$$
$$K_h = \frac{f}{p_h}\sin\nu\cos\nu \mp \sin^2\nu. \quad (1.91)$$

Принимая $K_s = 100$, $K_h = \pm 10, \pm 20, \pm 100$, на вертикальном круге от основной окружности наносят кривые s и h, откладывая величины

$$\rho_s = \frac{f\cos^2\nu}{K_s \pm \sin\nu\cos\nu}, \quad \rho_h = \frac{f\sin\nu\cos\nu}{K_h \pm \sin^2\nu} \quad (1.92)$$

по радиусу вертикального круга при каждом значении угла наклона ν_i. Общий вид номограммы на вертикальном круге и в поле зрения трубы приведен на рисунке 1.105, *б* и 1.105, *в*; поле зрения номограммного тахеометра показано на рисунке 1.106.

Номограммный тахеометр 2ТаН используют для определения горизонтальных проложений со средней квадратической ошибкой m_s = 0,15 м при K_s = 100; 0,20 м при K_s = 200 на 100 м расстояния; превышений — с $m_h \le 3$ см на 100 м при $K_h = \pm 10$ и 6 см при $K_h = \pm 20$; углы с ошибками не более 8″ — для горизонтальных и 12″ — для вертикальных. Тахеометр имеет раздельные вер-

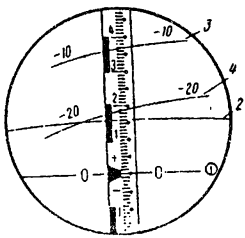


Рис. 1.106. Поле зрения номограммного тахеометра:
1 — основная кривая; 2 — кривая горизонтальных приложений; 3, 4 — кривые превышений при $K_h = -10$ и $K_h = -20$

тикальный и номограммный круги. Изготовлен унифицированно с теодолитом 2Т5К (угломерная часть и оси), имеет компенсатор вертикального круга, имеются оптический центрир и исправительные винты компенсатора для исправления МО в полевых условиях. Для быстроро ориентирования на горизонтальном круге помещен круг-искатель. Если не измеряют вертикальные углы, то поворотом рукоятки под зеркалом подсветки верхняя часть поля зрения зашторивается. Измерения по номограмме выполняют при КЛ.

Тахеометр 2ТаН выпускают со столиком, промежуточный кронштейн приподнимает тахеометр над планшетом. В комплект прибора входят штатив ПШ-160, две складные рейки с сантиметровыми делениями, круглыми уровнями и выдвижными пятками, буссоль и комплект масштабных линеек.

Тахеометр Дельта 010 изготавливают в Германии с 1969 г., позднее — Дальта 010А и Дальта 010В. Позволяет измерять горизонтальные проложения с относительной ошибкой 1/1000 и превышением с m_h = 3–10 см на 100 м по номограмме, горизонтальные и вертикальные углы с m = 5–6″. В последних моделях применены: улучшенная зрительная труба, оптический центрир, соосные винты, компенсатор при вертикальном круге с диапазоном действия 3–5′. В тахеометре Дальта 010В используют грубую и точную фокусировку, грубое и точное наведение по горизонтальному и вертикальному направлениям. В комплект входят 2 складные четырехметровые рейки, столик Карти, используемый для составления плана на каждой станции в полевых условиях на бумаге или пластике, накладываемых на диск.

1.5.29. Электронные тахеометры

Электронный тахеометр объединяет теодолит, светодальномер и микроЭВМ, позволяет выполнять угловые и линейные измерения и осуществлять совместную обработку результатов этих измерений. Кроме того, функции электронного тахеометра может выполнять прибор, получаемый путем установки на оптический или электронный теодолит малогабаритного автома-

тизированного топографического светодальномера (возможность такой установки предусмотрена на всех современных топографических светодальномерах), в этом случае регистрацию результатов угловых и линейных измерений выполняют раздельно, обработку выполняют на внешней ЭВМ.

Электронные тахеометры (ЭТ) делят на: 1) ЭТ с визуальным отсчетом углов и 2) ЭТ с электронным отсчетом (Total station — универсальные станции). В первом случае снимаемые визуально отсчеты по шкаловому микрометру или оптическому микрометру вводят в процессор ручным набором на клавиатуре, а во втором углы в цифровом виде выводятся на табло. Линейные величины выводятся на табло во всех случаях.

Автоматическое считывание углов выполняется путем их перевода в электрические сигналы при помощи аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Применяют в основном два вида АЦП — **кодовый** и **инкрементальный** (цифровой, дигитальный).

При **кодовом методе** лимб является кодовым диском с системой кодовых дорожек, обеспечивающих создание сигналов 0 и 1 в двоичной системе исчисления или сигналы в двоично-десятичных кодах, циклических и др., а также коды с избыточностью (корректирующие коды), позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки. Кодовый метод является абсолютным, при котором каждому направлению однозначно соответствует определенный кодированный выходной сигнал. Для считывания информации с кодовых дисков обычно используют фотоэлектрический способ, при котором диск просвечивают световым пучком, поступающим на фотоприемное устройство, и в результате на выходе получают комбинации электрических сигналов, соответствующих определенным значениям направлений. Затем электрические сигналы поступают в логические схемы, и в итоге измеряемая величина в цифровом виде воспроизводится на табло.

В **инкрементальном методе** используют штриховой растр (систему радиальных штрихов), который через одинаковые интервалы (до 100 штрихов на 1мм) наносят на внешний край лимба или алидады. Штрихи и равные им по толщине интервалы создают последовательность элементов «да-нет», которые называют инкрементами. Считывание выполняют также оптическим методом, числу прошедших инкрементов соответствует число световых импульсов, поступивших на светоприемник. Для учета направления вращения круга используют два фотоприемника, воспринимающих импульсные сигналы, сдвинутые по фазе на 90°, что достигается соответствующим размещением фотоприемников относительно растра или использованием двух одинаковых растров, сдвинутых относительно друг друга на 1/4 инкремента.

Инкрементальный метод является относительным, которым измеряют углы, а кодовым, который является абсолютным, — направления. Для повышения точности применяют системы, содержащие несколько расположенных определенным образом относительно круга пар фотодиодов, сигналы от которых сдвинуты по фазе, совместная обработка сигналов дает высокое угловое разрешение.

Микропроцессоры в электронных тахеометрах используют для управления, контроля и вычислений. На табло по команде с пульта управления процессора могут выдаваться наклонные расстояния, горизонтальные проложения, горизонтальные и вертикальные углы, превышения и др. В электронных тахеометрах последних моделей имеются микроЭВМ с памятью и устройством ввода и вывода данных, с регистрацией информации в запоминающем устройстве и ее выводом на внешний накопитель.

Имеется возможность в соответствии с заложенными программами в полевых условиях решать различные геодезические задачи, результаты могут выдаваться на табло, записываться в память или могут быть переданы на подключенный к прибору внешний накопитель информации.

Внешний полевой накопитель («электронный полевой журнал») хранит полученную в поле информацию для последующей обработки в камеральном вычислительном центре. Следовательно, современные электронные тахеометры позволяют создавать комплексную систему автоматизированного картографирования, состоящую из электронного тахеометра, полевого накопителя информации, стационарной ЭВМ и графопостроителя.

Электронная тахеометрия [1] позволяет решать следующие задачи:

1) сгущение геодезической сети методом полигонометрии;
2) измерение сторон в трилатерации;
3) создание планово-высотного обоснования;
4) привязка снимков;
5) топографическая крупномасштабная съемка местности;
6) геодезические работы при инженерно-геодезических изысканиях;
7) геодезическое обеспечение монтажных работ при строительстве зданий и инженерных сооружений;
8) геодезические работы на строительных площадках

и многие другие задачи геодезии, земельного и городского кадастра и т. п.

1.5.30. Отечественные и зарубежные электронные тахеометры

Отечественный **электронный тахеометр Та5** (рис. 1.107) является сочетанием шкалового теодолита 2Т5К со светодальномером СТ5 и микроЭВМ. Позволяет измерять расстояния до 1 км с отражателем из одной призмы

и 2,5 км — из 7 призм. Точность измерения горизонтального угла 5″, вертикального — 10″, расстояния — 20 мм. Теодолит имеет шкаловой отсчетный микроскоп и компенсатор маятникового типа, приводящие при наклоне визирной оси отсчетный индекс вертикального круга в исходное положение. Отсчеты с лимбов снимают визуально и вводят в вычислитель при помощи клавиатуры. Результаты измерения расстояний светодальномером вводятся в вычислитель автоматически. На цифровое табло выводится горизонтальное проложение, превышение, среднее значение горизонтального угла из двух полуприемов, вертикальный угол с учетом места зенита, приращение прямоугольных координат. Результаты измерений и вычислений могут быть автоматически введены во внешний накопитель для последующей обработки на ЭВМ.

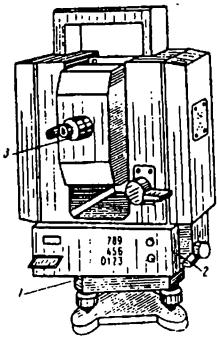


Рис. 1.107. Внешний вид тахеометра Та5:
1 — подставка;
2 — клавиатура;
3 — зрительная труба со светодальномером

Электронный теодолит ЗТА5 уральского оптико-механического завода используют для выполнения крупномасштабных топографических съемок, при инвентаризации земель, создании и обновлении земельного кадастра и решении задач с землеотводом (вынос проекта в натуру), измерение полярных и прямоугольных координат, высотных отметок, площадей земельных участков. Результаты измерений могут быть записаны на карту памяти или переданы в персональный компьютер типа IBM PC. Прибор может комплектоваться дополнительными принадлежностями и пакетом программ для обработки полевых измерений. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных углов — 5″, вертикальных — 7″, наклонных расстояний — $(5 + 3 \cdot 10^{-6} D)$ мм, диапазон измерения расстояний 2–2000 м, диапазон работы компенсатора — ± 5′, систематическая погрешность компенсации на 1′ не более 3″, увеличение трубы 29×.

Электронный тахеометр Та3 («Агат») имеет в единой конструкции кодовый теодолит, светодальномер и микроЭВМ. Позволяет измерять расстояния от 0,5 м до 5 км с точностью 10 мм + 3мм/км. Точность измерения горизонтальных углов 3″, вертикальных — 5″, вертикальный круг имеет автомати-

ческий компенсатор. МикроЭВМ обеспечивает управление прибором, контроль операций и решение различных геодезических задач, отмеченных выше.

Прибор имеет 4 режима работы: раздельный, полуавтоматический, автоматический и слежения (трекинг). При решении геодезических задач учитываются поправки на кривизну Земли и рефракцию, на разновысотность штатива прибора и отражателя и т. п. Углы могут выдаваться в гонах и градусах. Тахеометр имеет оптический центрир и возможность выполнять измерения по трехштативной системе. Имеется электрооборудование для работы ночью. Информация может быть записана в накопителе, что позволяет использовать прибор как основное звено автоматизированного комплекса, завершающегося графопостроителем.

Зарубежные электронные тахеометры [1] изготавливают различные фирмы: GeoDat фирмы «Геотроникс», Rec фирмы «Оптон», SDR фирмы «Сокиа» и др. Большое внимание в этих приборах уделяется возможности простой и легкой сборки модульных электронных тахеометров, позволяющих с максимальной эффективностью использовать выпускаемые приборы, синтезируя их различным образом в зависимости от вида работ.

Электронные тахеометры неразъемной конструкции («универсальная станция») с электронным отсчетом углов и полной автоматизацией измерений наиболее целесообразны в интегральных системах автоматического картографирования. Все приборы имеют коаксиальное совмещение приемной и передающей оптической системы дальномера и зрительной трубы, компенсатор вертикального круга для установки нулевого диаметра в горизонтальное положение, электронный датчик углов наклона для автоматического определения превышения и горизонтального проложения, режим трекинга и т. п. Каждый прибор, кроме того, имеет свои особенности.

Геодиметр 400 позволяет измерять расстояние в стандартном режиме с точностью ±(5 мм + 5 мм/км), в режиме повышенной точности — ±(3 мм + 3 мм/км), в режиме трекинга с максимальной скоростью движения отражателя 4 м/с — ±(10 мм + + 5 мм/км). Точность измерения углов 2″ в стандартном и 1″ в повышенной точности режимах. Подобные характеристики имеют и другие электронные теодолиты. Новшества, имеющиеся в геодиметре 400, сводятся к следующим.

1. Система электронного контроля угловых измерений, позволяющая без потери точности работать при одном круге, что стало возможным благодаря полному исключению эксцентриситета и ошибок делений лимба, автоматической компенсации нарушения центрировки прибора в процессе работы, автоматической коррекции коллимационной ошибки и наклона оси вращения трубы.

2. Электронный уровень, позволяющий автоматически нивелировать прибор без его вращения вокруг вертикальной оси.
3. Многофункциональный дисплей на жидких кристаллах с четырьмя строчками по 16 разрядов в каждой с возможностью отображать сразу большой объем информации.
4. Треклайд — устройство для «самонаведения» реечника, позволяющее ему быстро отыскать луч от прибора и установить на него отражатель, смонтированный на рейке. Устройство дает белый цвет, если реечник находится в створе, при отклонении влево — зеленый, вправо — красный.
5. Разговорное устройство («Юником») для односторонней речевой связи с реечником. На рейке смонтирован приемник, передача ведется по оптическому лучу в ИК-диапазоне.

Тахимат ТС2000 имеет высокую точность угловых, 0,5″, и линейных — ±(2 мм + 2 мм/км) измерений. Угломерная часть является электронным теодолитом Теомат Т2000. Высокая точность измерения углов обеспечивается оригинальной динамической системой оптоэлектронного сканирования при считывании с растрового круга. При каждом отсчете используется сканирование по всему кругу, что исключает ошибки деления круга (лимба), считывание диаметрально противоположных штрихов исключает ошибку за эксцентриситет, исключается также коллимационная ошибка горизонтального круга и автоматически корректируется ошибка индекса вертикального круга. Прибор полностью автоматизирован, к нему может быть подключен внешний накопитель информации. Является прецезионным прибором, который можно использовать для различных высокоточных измерений.

Электронный тахеометр серии ДТМ-500 корпорации Nikon, Япония, имеет прямое изображение зрительной трубы с увеличением 33$^{\times}$ (21$^{\times}$, 41$^{\times}$ с дополнительными окулярами), минимальное расстояние фокусировки 1,3 м при хорошей видимости.позволяет измерять расстояние от 5 до 100 м на рефлекторную марку, до 1100 м — на мини-призму, 2700 м — на одну призму, 3600 м — на 3 призмы и 4400 м — на 9 призм. Точность измерения расстояний $\pm(2 + 2D10^{-6})$ мм и $(4 + 2D10^{-6})$ мм — в режиме трекинга, точность угловых измерений 1″, имеется жидкостно-электрический компенсатор с точностью установки ±1″. Оптический центрир имеет увеличение 3$^{\times}$ и прямое изображение. Дисплей — жидкокристаллический (16 символов, 4 строки), на обеих сторонах. Память — 5000 точек. Все модели ДТМ-500 имеют оборудование, излучающее два когерентных красных световых луча, постоянный и мерцающий, которые позволяют легко и быстро выносить точки в натуру от 100 м от прибора с точностью

6 см на 100 м. Информация может передаваться как на, так и из компьютера с помощью стандартного программного обеспечения, можно также передавать с компьютера на тахеометр список специальных кодов.

1.5.31. Понятие о гидростатическом и гидродинамическом нивелировании

В основу устройства гидростатических нивелиров положено свойство жидкости устанавливаться в сообщающихся сосудах на одинаковом уровне.

Превышение h (рис. 1.108, *а*) между точками A и B, на которых установлены сосуды

$$h=(d_2-c_2)-(d_1-c_1)=K-(c_2-c_1), \tag{1.93}$$

где $K = (d_2 - d_1,)$ для данной пары сосудов является постоянной величиной.

Поменяв сосуды местами (рис. 1.108, *б*), находим

$$h=d_1-c_1'-(d_2-c_2')=(c_2'-c_1')-(d_2-d_1)=(c_2'-c_1')-K. \tag{1.94}$$

Из полученных выражений имеем

$$\begin{aligned} h&=\frac{1}{2}\left[(c_2'-c_1')-(c_2-c_1)\right];\\ K&=\frac{1}{2}\left[(c_2-c_1)+(c_2'-c_1')\right]. \end{aligned} \tag{1.95}$$

Превышение и можно определить по первой из формул (1.95) или, чаще, после определения K по второй формуле (1.95), по формулам (1.93), (1.94).

Описанный принцип положен в основу шлангового технического нивелира (НШТ-1), в котором сообщающиеся сосуды выполнены в виде стеклянных

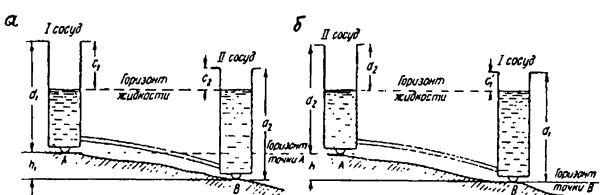


Рис. 1.108. Схема гидростатического нивелирования

цилиндров в металлической оправе, в цилиндрах плавают кольцевые поплавки с нанесенными на них кольцевыми рисками. Положение поплавка относительно нарезанной на стеклянном цилиндре шкалы определяют на глаз. Сосуды устанавливают на точки или подвешивают на стенные реперы. Средняя квадратическая ошибка измерения превышения до 200 мм равна 0,5 мм.

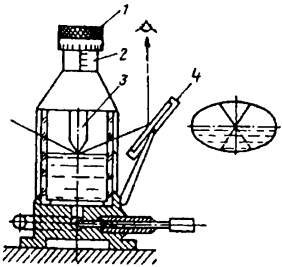


Рис. 1.109. Контактно-визуальный гидростатический нивелир

В контактно-визуальных гидростатических нивелирах (рис. 1.109) определяют момент касания острием измерительного штока 3 уровня жидкости. В зеркале 4 при вращении микрометренного винта 1 наблюдают сближение острием действительного и отраженного штока. Отсчитывают по шкале 2 микрометренного винта. На этом принципе основаны конструкции гидростатических нивелиров УГС (модель 15), б. СССР, и МЕЙССЕРА, б. ГДР. В них при превышениях 25–100 мм средняя квадратическая ошибка измерений равна 0,01–0,02 мм.

Стационарные автоматизированные системы с дистанционным съемом информации используют для наблюдения за осадками сооружений. В них положение уровня жидкости в сосудах определяют автоматически с помощью электрических или оптико-электронных датчиков.

Система гидродинамического нивелирования с поршневым устройством (СГДН-ПУ), созданная в Ереванском политехническом институте, состоит из сообщающихся между собой сосудов с жидкостью, устанавливаемых в определяемых точках, и поршневого устройства. В каждом рабочем сосуде установлен игольчатый шток, связанный приводом с блоком управления и регистрации (БУР). При равномерном опускании с помощью электродвигателя поршня вниз жидкость в рабочих сосудах равномерно поднимается. Специальный счетчик в БУРе определяет перемещение поршня от начала его движения до момента контакта игольчатого штока с поверхностью поднимающейся жидкости в каждом рабочем сосуде. Система выполняет измерения со средней квадратической ошибкой 0,1 мм.

1.5.32. Микронивелирование

Микронивелирование используют при монтаже и выверке технологического оборудования с высокой точностью при коротких (900–1200 мм) расстояниях между точками. Микронивелир с переменной базой (рис. 1.110) имеет

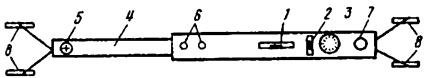


Рис. 1.110. Схема микронивелира

цилиндрический уровень 1 с ценой деления 2–10″ и поперечный уровень 2 с ценой деления 30-6″. В корпус нивелира входит штанга 4 со шток-опорой 5, зажим штанги выполняется винтами 6. Пузырек цилиндрического уровня устанавливают в нуль-пункт подъемным винтом 7. Для передвижения микронивелира по исследуемой поверхности на концах базы имеются ролики 8.

При измерении сначала перемещением штанги устанавливают опоры на точках *A* и *B* (рис. 1.111), затем подъемным винтом приводят пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт и берут отсчеты *a* по шкале 3 индикатора. Поворачивают прибор на 180°, приводят пузырек уровня в нуль-пункт и берут отсчет *в*. Учитывая, что отсчет по индикатору уменьшается с увеличением штока, превышения

$$h = MO - a, h = b - MO,$$

откуда

$$h = (b - a)/2, MO = (a + b)/2,$$

где *MO* — место нуля.

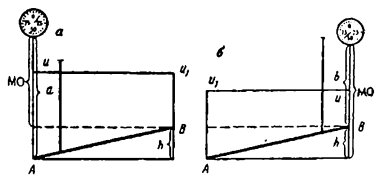


Рис. 1.111. Схемы определения превышения:
а – в прямом ходе; *б* — в обратном

Микронивелиром измеряют превышения с ошибкой на станции 0,01–0,02 мм

Раздел 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Глава 2.1. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ

2.1.1. Назначение и состав полевых опытных работ

Для проектирования различных сооружений и инженерных работ, оценки устойчивости территорий и для прогноза угрожаемости развития геологических процессов и явлений всегда необходимы данные, характеризующие физические, водные и механические свойства горных пород и параметры водоносных горизонтов. Их сравнительно легко получают при выполнении соответствующих лабораторных исследований образцов (проб), отобранных при инженерно-геологической съемке территорий, и главным образом при выполнении разведочных работ. Однако лабораторные исследования обычно выполняются на образцах малых размеров, полную сохранность естественного сложения которых никогда нельзя гарантировать. Поэтому получаемые лабораторные данные, особенно для обоснования технического и рабочего проектов ответственных сооружений, необходимо проверять и уточнять более надежными полевыми методами. Кроме того, во многих случаях отобрать пробы горных пород естественного сложения вообще бывает невозможно. Так, например, современными техническими средствами не представляется возможным отобрать пробы естественного сложения из мягких связных глинистых пород неустойчивой текучей консистенции, из несвязных песчано-гравийных пород рыхлого сложения, из водоносных песков-плывунов, из трещиноватых скальных и сильно трещиноватых полускальных пород и некоторых других. Все это вызывает необходимость выполнять специальные полевые исследования горных пород и водоносных горизонтов в условиях их естественного залегания на опытных участках с помощью крупномасштабных приборов и установок.

Следовательно, полевые опытные работы выполняются с целью получения более достоверных и надежных данных, характеризующих физико-механические свойства горных пород и водные свойства водоносных горизонтов. Только на основе таких данных можно при проектировании сооружений принимать оптимальные и экономически наиболее выгодные инженерные решения и гарантировать строительство и устойчивость сооружений от возможных геологических неожиданностей.

Необходимость в выполнении полевых опытных работ диктуется также и тем, что только в результате их выполнения можно получить многие исходные

данные о свойствах горных пород, водоносных горизонтов и об условиях производства строительных и горных работ. Например, надежные данные для расчета свайных фундаментов, оценки устойчивости сооружений на скальных и отчасти полускальных горных породах, для проектирования противофильтрационных завес и многих других видов искусственного улучшения свойств горных пород. К ним относятся данные о водообильности водоносных горизонтов, удельном дебите скважин, удельном водопоглощении горных пород, зависимости прочности и деформируемости горных пород от их физического состояния, зависимости водопроницаемости горных пород от степени их трещиноватости и закарстованности и др. Наконец, только с помощью полевых опытных работ можно выявлять важные закономерности, определяющие те или иные изменения свойств горных пород или развитие геологических процессов.

Таким образом, полевые опытные работы являются важнейшим видом инженерных изысканий. Переоценить их значение при решении различных инженерных задач невозможно. Они позволяют:

1) получать наиболее надежные и достоверные количественные характеристики свойств горных пород и водоносных горизонтов в условиях естественного сложения и залегания;
2) исследовать свойства слабых, неустойчивых водоносных горных пород, изучение которых другими методами невозможно;
3) выявлять важные закономерности изменений свойств горных пород и развития геологических процессов;
4) определять исходные параметры для проектирования организации производства отдельных видов строительных работ.

В практике инженерно-геологических изысканий полевые опытные работы наиболее часто выполняют для исследования:

1) направления и скорости движения подземных вод методами запуска индикаторов, электрометрическим, заряженного тела и др.;
2) водообильности водоносных горизонтов и дебита скважин, колодцев и других водозаборов методом опытных откачек;
3) водопроницаемости горных пород методом опытных откачек;
4) взаимосвязи между водозаборами и водоносными горизонтами методом опытных откачек;
5) водопроницаемости горных пород методом налива в шурфы и скважины;
6) водопроницаемости, трещиноватости и закарстованности горных пород методом опытных нагнетаний;
7) сравнительной сжимаемости и деформационных свойств горных пород методом пробных нагрузок;

8) деформационных свойств горных пород в скважинах с применением прессиометра;
9) просадочности лессовых пород методом пробных нагрузок;
10) сопротивления горных пород сдвигу по методу плоского сдвига;
11) сопротивления горных пород сдвигу в скважинах с применением лопастных приборов;
12) сопротивления горных пород сдвигу методом выдавливания и раздавливания целиков горных пород;
13) плотности и прочности горных пород методом статического зондирования;
14) плотности и прочности горных пород методом динамического зондирования;
15) напряженного состояния горных пород в условиях естественного залегания методом разгрузки;
16) горного давления в подземных выработках;
17) устойчивости горных пород в опытных котлованах и горных выработках;
18) скорости выветривания горных пород на опытных площадках;
19) параметров, характеризующих условия цементации горных пород, методом опытной цементации.

Первые четыре вида исследований производятся для характеристики водоносных горизонтов, зон и комплексов, все остальные — для изучения физического состояния и определенных свойств горных пород. Заметим, что некоторые виды геофизических работ, по существу, также являются полевыми опытными, широко применяемыми при инженерно-геологических исследованиях. Например, определение плотности и влажности горных пород ядерными методами, исследование деформационных свойств горных пород сейсмическими и микросейсмическими методами и др. При решении тех или иных конкретных инженерных задач в зависимости от особенностей геологических условий могут применяться и другие, новые виды полевых опытных работ, внедрение которых надо всячески поддерживать.

Из сказанного следует, что значение полевых опытных работ огромно, но из этого совершенно не следует делать вывод о том, что можно пренебрегать данными лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород и что их значение невелико при решении инженерных задач. Данные лабораторных исследований также имеют большое значение на всех стадиях инженерных изысканий, на что нами обращалось внимание ранее. При лабораторных исследованиях можно получать массовые определения свойств горных пород, причем стоимость их несопоставимо мала по сравнению со сто-

имостью выполнения полевых опытных работ. Особенно большое значение лабораторные исследования имеют для оценки свойств мягких (связных) глинистых пород и рыхлых (несвязных) песчаных и несравненно меньшее — для оценки свойств твердых (скальных) и полутвердых (полускальных) пород. При рациональной организации инженерных изысканий, особенно на стадии детальных исследований при обосновании проектов ответственных сооружений, полевыми опытными работами следует сопровождать массовые лабораторные исследования с целью их проверки и уточнения.

2.1.2. Положение полевых опытных работ в общем комплексе геологических работ при инженерных изысканиях

Полевые опытные работы нельзя выполнять изолированно от других видов геологических работ. Их положение наглядно было показано на рисунке 1.2, из которого видно, что они являются составной частью системы инженерных изысканий. Если инженерно-геологическая съемка, выполняемая преимущественно на начальных стадиях изысканий, и разведочные работы, выполняемые на последующих стадиях, позволяют получать представления об инженерно-геологических условиях территории или строительной площадки со степенью детальности, соответствующей стадии изысканий, то полевые опытные работы дают возможность уточнять эти представления и давать количественную оценку основных элементов инженерно-геологических условий, т. е. свойств горных пород, водоносных горизонтов, геологических процессов и др.

Установленные съемкой и разведкой закономерности неоднородности и изменчивости инженерно-геологических условий территорий подтверждаются и уточняются полевыми опытными работами. Таким образом последовательно повышаются достоверность и детальность изучения инженерно-геологических условий рассматриваемой территории.

Основной объем полевых опытных работ выполняется на стадии детальных исследований, т. е. при обосновании технических проектов сооружений. Эти работы как бы в полном объеме сопровождают разведку и позволяют давать наиболее достоверную и надежную оценку инженерно-геологических условий строительства сооружений, опасных геологических процессов и т. д. Именно на этой стадии полевые опытные работы должны служить средством для обоснованного выбора расчетных показателей свойств горных пород, водоносных горизонтов и т. д. На стадиях рекогносцировочных и предварительных исследований эти работы выполняются, когда они необходимы для более надежного технико-экономического обоснования выбора района расположения первоочередного объекта строительства, выбора строительной площадки, трассы дороги,

основных параметров проектируемых сооружений и т. д. В сравнительно значительном объеме они выполняются также и на стадии дополнительных исследований при рабочем проектировании. В этот период уточняют расчетные показатели, организацию производства строительных работ и оценку устойчивости сооружений. Поэтому опытные работы на этой стадии изысканий продолжаются, но уже непосредственно на участках расположения определенных сооружений, в строительных котлованах, подземных выработках и т. д.

Рациональное сочетание полевых опытных работ с другими видами геологических работ обеспечивает комплексность инженерных изысканий и соответственно полное решение поставленных перед ними задач.

2.1.3. Общие требования к организации и постановке полевых опытных работ

Полевые опытные работы называются так только потому, что они выполняются в полевых условиях на опытных участках. Выбор мест расположения этих участков обосновывается с помощью других видов геологических работ. В этом состоит взаимосвязь полевых опытных и других геологических работ.

При рациональной организации изысканий полевые опытные работы в том или ином объеме должны сопровождать другие виды геологических работ. Инженерно-геологическая съемка, разведочные и другие геологические работы позволяют выявлять закономерности распределения неоднородности и изменчивости инженерно-геологических условий, т. е. разделять рассматриваемую территорию или строительную площадку на отдельные части разного рода, геологический разрез на разного рода слои, горизонты и зоны, а также водоносные горизонты, геологические процессы, явления и т. д. Для дальнейшего изучения и оценки каждой выделенной элементарной части слоя, горизонта и т. д. выполняются специальные полевые опытные работы. При определении мест расположения опытных участков необходимо руководствоваться direкционностью изменений свойств горных пород, водоносных горизонтов и т. д., а также планом (компоновкой) расположения проектируемых сооружений.

Опытные работы позволяют наиболее полно и точно оценивать типичные, характерные условия каждой выделенной части рассматриваемой территории или строительной площадки, а на стадии детальных исследований — участки расположения определенных сооружений. В этом случае необходимо стремиться к тому, чтобы интерполяция и экстраполяция данных, полученных в результате проведения опытов, производились на самые малые расстояния от мест расположения проектируемых сооружений. Полевые опыты должны проводиться так, чтобы они давали возможность исследовать

и оценивать в первую очередь наиболее слабые горизонты и слои горных пород в зоне влияния проектируемых сооружений, т. е. те, которые определяют устойчивость всей вышележащей толщи пород, проектируемого сооружения или участка территории.

Вид опытных работ определяется теми задачами, которые приходится решать в связи с оценкой устойчивости территории при проектировании конкретного сооружения или инженерных работ. Так как горные породы обладают некоторой изменчивостью состава, состояния и свойств в пространстве, нельзя руководствоваться единичными испытаниями (опытами), их следует повторять в количествах, достаточных для получения достоверной и надежной характеристики и оценки пород. При изучении отдельных процессов и явлений опытные работы, кроме того, надо повторять в характерные периоды режима их развития. Таковы основные общие требования к организации и постановке полевых опытных работ. Кратко они сводятся к следующему.

1. Каждый полевой опыт следует проводить для решения определенной конкретной задачи, связанной с характеристикой и оценкой устойчивости территорий, сооружений, определенных свойств горных пород, водоносных горизонтов, условий производства строительных и горных работ.
2. Выбор каждого опытного участка или группы их следует производить так, чтобы получать характеристику и оценку наиболее характерной, типичной части исследуемой территории или строительной площадки. На стадии детальных и дополнительных исследований опытные работы надо выполнять на участках непосредственного расположения сооружений с целью изучения определенного слоя, горизонта или зоны горных пород, водоносного горизонта и т.д.
3. Необходимо знать в деталях геологический разрез — геологическое строение каждого опытного участка. Пространственное положение, глубину залегания и мощность каждого слоя и горизонта, которые намечено исследовать полевыми методами, необходимо устанавливать точно, инструментально.
4. Виды опытных работ и методика их проведения должны максимально приближаться к условиям развития процессов и явлений (моделировать их), как природных, так и связанных со строительством сооружений, к условиям работы горных пород под нагрузкой, режиму и динамике подземных вод и т. д.
5. Полевые опытные работы должны сопровождать другие виды геологических работ, и в том числе массовые лабораторные исследования, с целью проверки, уточнения и количественной оценки свойств горных пород, водоносных горизонтов, для решения других конкретных задач и более надежного обоснования расчетных показателей.

Глава 2.2. ИСПЫТАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТАТИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ (ШТАМПОМ)

Исследование сравнительной сжимаемости, деформационных свойств и просадочности горных пород методом пробных статических нагрузок

Это один из достаточно хорошо апробированных многолетней практикой методов полевых испытаний горных пород. Сущность его состоит в испытании горных пород в условиях естественного залегания пробной нагрузкой, передаваемой на них через штамп, и наблюдениях за их сжимаемостью или просадочностью. Данные этих наблюдений позволяют оценивать деформационные свойства горных пород и вычислять показатели, их характеризующие. Схемы таких испытаний показаны на рисунке 2.2.1, а их результаты в виде графиков зависимости осадки штампа от действующей нагрузки во времени $S = f(t)$ и осадки штампа от действующих нагрузок $S = f(P)$ — на рисунках 2.2.2 и 2.2.3.

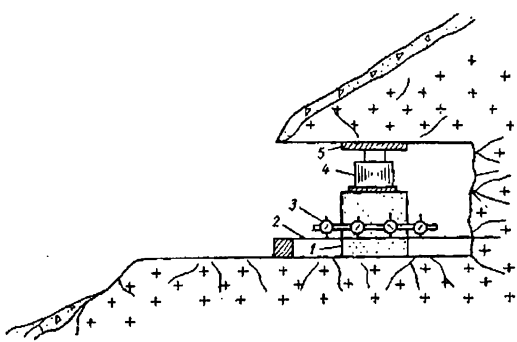


Рис. 2.2.1. Схема установки для испытания горных пород в подземной горной выработке пробными статическими нагрузками:
1 — штамп (бетонный массив); 2 — упор, на который упираются штифты индикаторов; 3 — индикатор часового типа для измерения осадки штампа;
4 — гидравлический домкрат; 5 — опорная плита

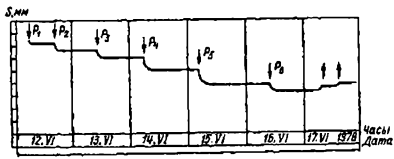


Рис. 2.2.2. График зависимости осадки штампа от действующей нагрузки во времени [$S = f(t)$]

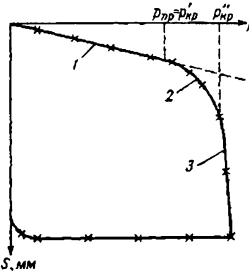


Рис. 2.2.3. График зависимости осадки штампа от действующей нагрузки во времени [$S = f(P)$]: 1 — фаза преобладающего развития уплотнения породы; 2 — фаза заметного развития сдвигов, заметного разрушения породы; 3 — фаза значительного развития сдвигов — полного разрушения породы

Испытания пробными статическими нагрузками производят при исследовании любых горных пород — скальных, полускальных и особенно часто разнообразных песчаных и глинистых — как наиболее сжимаемых и податливых при воздействии на них нагрузки от сооружений. Имеется очень много примеров испытаний скальных и полускальных горных пород этим методом.

Главными задачами опытных работ являются:

1) исследование сравнительной сжимаемости горных пород на разных участках или глубинах; эти данные представляют интерес при инженерно-геологической оценке территорий, выборе строительных площадок, обосновании компоновки сооружений на выбранной площадке или глубины заложения фундаментов;

2) определение показателей деформационных свойств горных пород (модуль общей деформации) для обоснования проектов фундаментов сооружений и обеспечения их устойчивости;
3) оценка просадочности лессовых пород при замачивании или мерзлых пород при оттаивании.

Из этого перечня основных задач, решаемых методом пробных статических нагрузок, видно, что такие же задачи можно решать с помощью, например, компрессионных испытаний песчаных и глинистых пород в лабораторных условиях. Однако в лабораторных условиях испытываются образцы малых размеров (площадью 49–60 $см^3$, высотой 15–20 мм), тогда как при полевых опытах испытания горных пород производят штампами больших размеров (площадью 600–5 000 $см^2$) в условиях естественного залегания — в массиве, толще, слое и т. д. Это крупногабаритные опыты, позволяющие получать несравненно более достоверные и надежные данные по сравнению с лабораторными. Поэтому результатами полевых опытов следует дополнять данные массовых лабораторных испытаний песчаных и глинистых пород и их контролировать, особенно при проектировании ответственных сооружений. Рациональное сочетание лабораторных и полевых исследований деформационных свойств песчаных и глинистых пород обычно позволяет получать наиболее представительные, надежные и достоверные данные для их характеристики и оценки. Это еще раз указывает на то, что не следует противопоставлять полевые опытные работы лабораторным, хотя необходимо четко представлять, что при инженерных изысканиях, особенно при обосновании технических и рабочих проектов сооружений, их значение трудно переоценить.

При проектировании сооружений на скальных и полускальных горных породах пробные статические нагрузки являются, по существу, единственным методом исследований их деформационных свойств.

Для выполнения пробных нагрузок необходимо иметь следующее оборудование: штамп, установку для нагружения штампа, приборы для измерения осадки штампа, оборудование для отбора проб горных пород до производства пробной нагрузки и после, журналы для записи наблюдений и вычерчивания рабочих графиков. Опытные нагрузки обычно продолжаются от 5–8 до 15–20 суток, а иногда и более, поэтому для обслуживающего персонала должна быть оборудована палатка или вагончик с полевой лабораторией.

Штамп для испытания горных пород пробной нагрузкой обычно представляет собой металлическую, бетонную или железобетонную плиту квадратной или круглой формы. Толщина металлического штампа обычно 40–50 мм, бетонного и железобетонного — 100–200 мм. Раньше стандартными считались

штампы следующих размеров: при производстве испытаний в горных выработках — площадью 5 000 см^2 (квадратным сечением 70,7×70,7 см, круглые диаметром 78,9 см), в скважинах — площадью 600 см^2 (диаметром 27,7 см).

В настоящее время ГОСТ рекомендует применять в горных выработках при испытаниях песчаных и глинистых пород плотного сложения жесткие круглые штампы площадью 2 500 см^2 (диаметром 56,2 см), в породах средней и малой плотности — площадью 5 000 см^2, а в скважинах, как и раньше, во всех случаях — площадью 600 см^2. ГОСТ допускает применение штампов площадью 1 000 см^2 при условии создания жесткой кольцевой пригрузки горных пород на площади до 5 000 см^2. Пригрузка должна равняться природному давлению на горные породы на глубине заложения штампа. При испытаниях сильно и неравномерно сжимаемых горных пород неоднородного строения (с прослойками, линзами и т. д.) целесообразно применять штампы больших размеров — 5 000 см^2 и 10 000 см^2 (диаметром 112,6 см). При испытаниях скальных и полускальных горных пород обычно изготовляют бетонные или железобетонные монолиты кубической формы размером 100×100×100 см.

Каждый штамп должен иметь точно обозначенный центр в виде выступа — штыря или гнезда для центрированной установки стойки, передающей нагрузку на штамп. Для удобства подъема и установки штампа в шурфе или котловане краном или лебедкой в нем должны быть сделаны специальные петли.

Нормальное пропорциональное увеличение осадки с увеличением размера штампов наблюдается только тогда, когда их сечение не менее 25–30 см, т. е. площадь 600 см^2. У штампов меньших размеров проявляется эффект их вдавливания, причем тем сильнее, чем меньше их размер. Следовательно, при исследованиях сжимаемости песчаных и глинистых пород нельзя применять штампы площадью менее 600 см^2.

Основными частями установок, обеспечивающих выполнение пробных нагрузок, являются: стойка, передающая нагрузку непосредственно на штамп; центрирующее устройство, обеспечивающее действие нагрузки по вертикали; платформа для размещения груза или гидравлические домкраты; устройства для производства наблюдений за осадкой штампа. Назначение всех перечисленных деталей пояснений не требует.

Относительно устройств для измерения осадки штампов при пробных нагрузках следует заметить следующее. В настоящее время основными приборами для этой цели служат индикаторы часового типа и прогибомеры. Индикаторы часового типа хорошо известны, так как широко используются и в лабораторной практике для измерений деформаций горных пород. Такими индикаторами можно производить измерения с точностью до 0,01– 0,005 мм,

т. е. достаточной при исследованиях деформационных свойств не только песчаных и глинистых пород, но также скальных и полускальных.

Прогибомеры — это приборы для измерения прогибов — перемещения отдельных точек конструкции относительно некоторой неподвижной поверхности под действием нагрузки. Схема работы прогибомера показана на рисунке 2.2.4. При осадке штампа струна (стальная проволока), перекинутая через барабан, поворачивает редуктор (зубчатые колеса), и стрелка указывает значение, на которое произошло перемещение штампа. Цена деления на циферблате прогибомера равна 0,1 мм, а отсчет можно производить с погрешностью до 0,05 или даже 0,02 мм. Такая точность вполне достаточна для измерения деформации при выполнении пробных нагрузок.

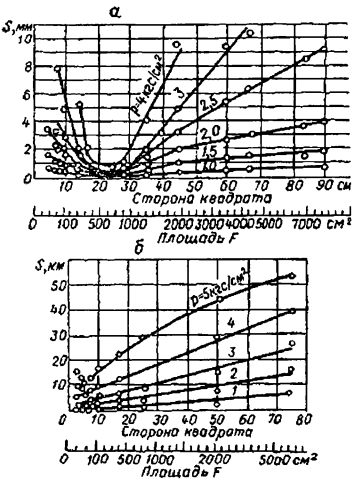


Рис. 2.2.4. Графики зависимости осадки штампов от их размеров при действии на них нагрузки: *а* — пески; *б* — суглинки

Порядок проведения пробных нагрузок сводится к следующему. При выборе места расположения опытного участка на начальных стадиях инженерных изысканий следует стремиться исследовать сжимаемость или просадочность всех типичных разностей горных пород, слагающих территорию или строительную площадку, которые могут служить непосредственным основанием для фундаментов проектируемых сооружений. Особое внимание при этом уделяют исследованию пород слабых, сильно и неравномерно сжимаемых. На стадиях детальных исследований, при обосновании технического и рабочего проектов конкретных сооружений участки исследований сжимаемости горных пород надо располагать в пределах зоны их влияния. Только в этом случае можно получить реальные данные для расчета оснований соору-

жений по деформациям и, следовательно, выполнить основное требование «Строительных норм и правил».

Так как пробными нагрузками необходимо исследовать сжимаемость и просадочность определенных разностей горных пород, слагающих толщи, слои, зоны и т. д., то прежде всего необходимо иметь полные и точные сведения о геологическом разрезе опытного участка. Если в непосредственной близости от него (до 3–8 м) нет разведочной выработки (скважины, шурфа), то необходимо ее пройти с целью проверки имеющихся данных о последовательности напластования отложений и точности положения границ в геологическом разрезе.

На опытный участок доставляется все необходимое оборудование, и в том числе грузы, если применяется установка с загрузочной платформой. В качестве грузов могут быть использованы бетонные блоки, строительный кирпич, металлические отливки (чушки) или другой подручный материал. Одновременно с подготовкой оборудования к опыту производят проходку опытного шурфа, котлована или бурение скважины. Сечение шурфа или котлована по дну целесообразно иметь не менее 1,5×1,5 м или 2,0×2,0 м в зависимости от применяемого размера штампа. Глубина шурфа обычно определяется глубиной заложения фундаментов сооружений. Если в пределах активной зоны основания фундаментов залегает один мощный однородный слой пород, то их испытание выполняют только на глубине заложения фундаментов. Если в активной зоне залегает несколько слоев или зон пород с различными свойствами, испытаниям должны подвергаться все несущие слои. Стенки опытного шурфа или котлована желательно крепить тем или иным способом во избежание их обрушения.

Испытания горных пород в скважинах производят при их залегании на глубине более 5–6 м или ниже уровня грунтовых вод. Обычный диаметр буровых скважин 325 мм (12"), а в качестве стойки для передачи нагрузки на штамп используют колонну труб диаметром 168 мм (6") или 219 мм (8").

В подземных выработках (штольнях, штреках, кессонах) испытаниям подвергаются те разности горных пород, которые представляют непосредственный интерес в связи с оценкой устойчивости проектируемых сооружений. Проходку подземных выработок обычно осуществляют по плану выполнения разведочных работ. Поэтому для опытов используют уже готовые штольни, штреки и т. д.

Опытные шурфы, котлованы и скважины в песчаных и глинистых породах вначале проходят не на полную глубину, а оставляют на забое целик мощностью 20–30 см, из которого отбирают монолиты для выполнения полного комп-

лекса лабораторных исследований физико-механических свойств пород, с обязательным испытанием их на компрессию. После отбора монолитов шурф или котлован углубляют до проектной отметки и дно их тщательно планируют по уровню. В скважинах забой также выравнивают буровой ложкой или специальным ножом для зачистки. Если в породах планировка дна шурфа, котлована или забоя скважины затруднительна, производят подсыпку слоя мелкозернистого или среднезернистого однородного песка толщиной не более 3–5 см.

При подготовке опытной выработки для испытаний горных пород необходимо уделять большое внимание сохранению их естественного сложения, плотности и влажности. С этой целью предусматривают все необходимые меры для защиты опытной выработки от искусственного увлажнения или затопления, высыхания и промораживания пород или механического разрушения.

На тщательно выровненную площадку дна опытной выработки устанавливают штамп и производят монтаж опытной установки. Штамп необходимо устанавливать в центре опытной выработки плашмя, осторожно, полной плоскостью, не допуская перекосов, вмятин и других нарушений сложения пород. После установки штампа проверяют его горизонтальность по уровню. Монтаж установки производят аккуратно, без резких динамических воздействий на породы, таким образом, чтобы нагрузка приходилась точно по центру штампа и строго вертикально (по отвесу). Поэтому при монтаже установки обращают особое внимание на монтаж и действие центрирующих устройств. По окончании монтажа установки на неподвижных брусьях крепят прогибомеры или индикаторы часового типа, стрелки которых ставят на нулевое деление.

При производстве опытов в буровых скважинах колонну труб со штампом опускают строго по вертикали через направляющую муфту на оголовке обсадных труб. Штамп устанавливают ниже башмака обсадных труб не более чем на 2–5 см. Вся установка для испытания горных пород в скважинах должна быть уравновешена противовесом.

Пробные нагрузки производят ступенями, причем каждая последующая ступень нагрузки прикладывается только после стабилизации осадки штампа от предыдущей. Стабилизация осадки штампа считается достигнутой, если ее приращение не превышает 0,1 мм в течение 1 ч на крупнообломочных и песчаных породах и 2 ч — на любых других породах. Каждая ступень нагрузки на податливые рыхлые несвязные породы, имеющие недостаточную плотность, глинистые, с неустойчивой консистенцией, должна равняться 0,25 кгс/см^2, на все остальные — не менее 0,5 кгс/см^2. Первая ступень нагрузки должна вклю-

чать вес штампа и установки, а в буровых скважинах — ту часть нагрузки, которая не уравновешена противовесом.

ГОСТ рекомендует выполнять испытания с предварительным уплотнением пород нагрузкой, равной природной на отметке подошвы штампа, но не меньшей, чем 0,5 кгс/см^2. Это правило целесообразно выполнять при испытании пород на глубинах более 4–5 м; при обычных глубинах заложения фундаментов, равных не более 2,0–2,5 м, особенно в песчаных и глинистых породах, нет смысла производить предварительное уплотнение пород, тем более, что оценка деформационных свойств пород производится по прямолинейному участку кривой, выражающей зависимость осадки штампа от нагрузки.

Общее число ступеней нагрузки зависит от податливости (сжимаемости) пород и предполагаемой нагрузки от сооружения. Конечная ступень нагрузки должна превышать проектируемую от сооружения на 1–2 кгс/см^2. По ГОСТ общее число ступеней должно быть не менее пяти. При исследованиях песчаных и глинистых пород необходимо стремиться получить полную кривую развития осадки штампа с целью выявления основных фаз деформации пород (см. рис. 2.2.3). В этих случаях конечная ступень нагрузки должна превышать критическую нагрузку, при которой кривая зависимости осадки от нагрузки приобретает криволинейный характер, т. е. осадка начинает развиваться быстрее, чем увеличение прикладываемой нагрузки.

При выполнении пробных нагрузок с помощью гидравлических домкратов необходимо следить за постоянством заданного давления по показаниям манометров. При осадке штампа в цилиндрах домкратов неизбежно снижение давления, поэтому для его поддержания необходимо производить подкачку домкратов, но лучше применять автоматическое устройство для этого. Падение давления в домкратах может происходить также вследствие утечки масла при истирании манжетов в цилиндрах, нарушения сальникового уплотнения вентилей и других соединений. Удельное давление, создаваемое гидравлическими домкратами, вычисляется по формуле:

$$p_i = \frac{p_м F_Ц}{F_{шт}},$$

где p_i — удельное давление штампа на горные породы, кгс/см^2; $p_м$ — показания манометра, кгс/см^2; $F_Ц$ — площадь поршня в цилиндрах домкрата, см^2; $F_{шт}$ — площадь штампа, см^2.

При каждой ступени пробной нагрузки наблюдения за осадкой штампа производят: при испытаниях крупнообломочных и песчаных пород через

каждые 10 минут, глинистых — через 15 минут в течение первого часа и соответственно через 20 и 30 минут в течение второго часа. В дальнейшем во всех случаях наблюдения производят через каждый час до стабилизации осадки штампа.

После стабилизации осадки штампа от последней ступени нагрузки производят его разгрузку также ступенями и ведут наблюдения за упругой отдачей, т. е. обратимыми деформациями горных пород после снятия каждой ступени нагрузки. Производят демонтаж установки, а затем отбор монолитов пород из-под штампа для исследования их свойств после пробной нагрузки.

Все наблюдения при производстве пробных нагрузок заносят в журнал специальной формы, в котором отмечают также все наблюдения за состоянием горных пород вокруг штампа — появлением трещин, валиков выпирания и др. Журнал документации опытов сопровождают геологическим разрезом опытного участка и схемой, изображающей опытную установку и расположение опытного штампа.

Таков порядок производства пробных нагрузок с целью исследования сжимаемости и деформационных свойств горных пород. Результаты этих исследований изображают в виде графиков зависимостей $S = f / (t)$ (см. рис. 2.2.2) и $S = f (P)$ (см. рис. 2.2.3), а модуль общей деформации горных пород вычисляют по формуле:

$$E_0 = (1-\mu^2) W d \frac{\Delta p}{\Delta S},$$

где E_0 — модуль общей деформации горных пород, кгс/см^2; μ — коэффициент поперечной деформации горных пород по данным испытаний образцов в лабораторных условиях или принимаемый равным 0,15 для скальных пород, 0,25 — для полускальных, 0,27 — для крупнообломочных, 0,30 —для песков и супесей, 0,35 — для суглинков и 0,42 — для глин; W — безразмерный коэффициент, зависящий от формы и размера штампа, принимаемый равным 0,8; d — диаметр штампа, см; Δp — приращение удельной нагрузки на штамп для прямолинейного участка графика зависимости $S = f (P)$; ΔS — приращение осадки штампа, соответствующее интервалу приращения нагрузки Δp, см.

Исследования многих специалистов показали, что модуль общей деформации разнообразных песчано-глинистых пород по результатам пробных статических нагрузок обычно больше модуля общей деформации, вычисленного по данным компрессионных испытаний. Поправочный коэффициент, именуемый в литературе часто коэффициентом И. А. Агишева, обычно больше единицы и для многих разностей глинистых пород равен двум. Примерные зна-

чения модуля общей деформации для различных групп и типов горных пород приведены в «Курсе инженерной петрологии».

Для изучения просадочности лессовых пород при замачивании и мерзлых пород при оттаивании порядок производства пробных нагрузок следующий. Подготовка опытов и начало их проведения такие же, как и при обычных испытаниях горных пород, описание которых приведено выше. После уплотнения лессовых пород в условиях естественного сложения и влажности первыми ступенями нагрузки (до 2–3 кгс/см^2) их искусственно замачивают и наблюдают за развитием просадки, т. е. значительной, часто катастрофически быстрой и неравномерной осадкой штампа. С этой целью после стабилизации осадки штампа от одной из ступеней нагрузки (равной ~2–3 кгс/см^2) шурф или котлован заливают водой, уровень которой в процессе замачивания пород и проведения опыта поддерживают постоянным. Для предупреждения размыва пород вокруг штампа их предварительно покрывают слоем песка толщиной 3–5 см.

Просадка в различных лессовых породах развивается с разной скоростью, но обычно непрерывно, плавно или скачками по мере их промачивания. Поэтому в первые несколько часов наблюдения за развитием просадки производят через каждые 20 минут, а затем, по мере затухания просадки, — через каждый час до стабилизации деформации лессовых пород, т. е. до того момента, когда деформация не будет превышать 0,1 мм за 2 ч.

При исследованиях просадочности мерзлых пород при оттаивании после стабилизации осадки штампа от одной из ступеней нагрузки (равной ~2–3 кгс/см^2) производят искусственное протаивание пород. Для этого в 0,4–0,5 м от штампа уже при подготовке опыта пробуривают 5–8 скважин, в которых устанавливают колонки-змеевики для циркуляции по ним горячей воды или пара или электронагреватели. Искусственный прогрев горных пород производят непрерывно и равномерно в течение всего опыта до стабилизации осадки штампа. Измерения осадки штампа производят в том же порядке, что и при исследованиях просадочности лессовых пород.

После стабилизации деформации горных пород вследствие развития просадочных явлений продолжают пробную нагрузку штампа двумя-тремя ступенями нагрузки, как и при обычном опыте. По завершении осадки штампа от последней ступени нагрузки его разгружают также ступенями и наблюдают за обратимыми деформациями горных пород, демонтируют установку и производят отбор проб из-под штампа для исследования физико-механических свойств горных пород после опыта. Все наблюдения при выполнении опытов записывают в специальный журнал, а окончательные результаты изображают в виде графиков.

Показателем просадочности пород является отношение просадки опытного штампа от замачивания $S_{пр}$ к осадке только от нагрузки $S_{ос}$, т. е.

$$M = \frac{S_{пр}}{S_{ос}}.$$

Этот показатель для лессовых пород различных районов изменяется от 2 до 18, для явно просадочных лессовых пород он обычно больше 5.

Опытных данных о просадочности мерзлых пород при искусственном оттаивании пока накоплено мало. При оценке их просадочности пользуются тем же показателем M, что и для лессовых пород, только величина просадки опытного штампа в этом случае связана с протаиванием мерзлых пород. Описание свойств лессовых и мерзлых пород и природы их просадочности приведено в соответствующих разделах «Курса инженерной геологии».

Испытания лессовых и мерзлых горных пород пробными статическими нагрузками позволяют, кроме оценки степени их просадочности, определять:

1) модуль общей деформации при естественном состоянии и влажности, используемый для расчета осадок фундаментов;
2) модуль общей деформации пород после их замачивания или оттаивания, используемый для расчета просадки фундаментов;
3) коэффициент изменчивости деформационных свойств пород, представляющий собой отношение модулей общей деформации пород естественного сложения и влажности и в водонасыщенном или талом состояниях, используемый при расчете конструкций зданий и сооружений на неравномерные просадки;
4) начальное минимальное давление, при котором проявляется просадка лессовой породы при замачивании и мерзлой породы — при оттаивании (рис. 2.2.5).

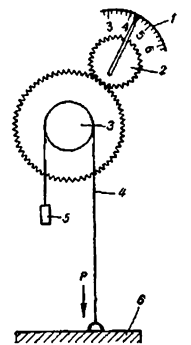


Рис. 2.2.5. Схема работы прогибомера для измерения осадки штампа при пробных статических нагрузках: 1 — циферблат; 2 — зубчатые колеса — редуктор; 3 — барабан; 4 — струна (стальная проволока); 5 — противовес; 6 — штамп

Глава 2.3. ИСПЫТАНИЕ ПРЕССИОМЕТРОМ

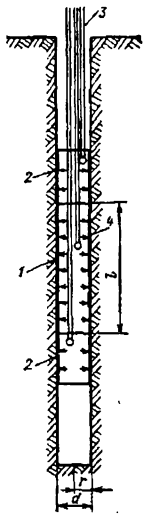


Рис. 2.3.1. Принципиальная схема работы прибора бокового давления — прессиометра:
1 — рабочая камера прессиометра; 2 — пригрузочные камеры; 3 — шланги напорные для подачи воды или газа в рабочую и пригрузочную камеры; 4 — стенка скважины; l — длина рабочей камеры; r и d — радиус и диаметр скважины

Исследование деформационных свойств горных пород в скважинах с применением прессиометров

Это один из современных и уже довольно широко применяемых методов изучения деформационных свойств горных пород. Сущность его та же, что и метода испытания горных пород пробными статическими нагрузками. Она состоит в исследовании изменений деформации горных пород, составляющих стенки скважин, при воздействии на них возрастающих ступеней нагрузки.

Эти исследования производят с помощью специального прибора бокового давления — прессиометра, представляющего собой цилиндр (камеру) с эластичными стенками (рис. 2.3.1). Его устанавливают на той или иной глубине в скважине и под воздействием давления жидкости (гидравлический прессиометр) или газа (пневматический прессиометр), нагнетаемых в камеру, производят уплотнение горных пород в стенках скважины и одновременно определяют значения действующего давления и деформации горных пород. По данным измерений вычисляют значение модуля общей деформации по формуле:

$$E_0 = (1+\mu) r_0 \frac{\Delta p}{\Delta r},$$

где μ — коэффициент поперечной деформации горных пород. Среднее значе-

ние μ крупнообломочных пород равно 0,27, песков и супесей — 0,30, суглинков — 0,35, глин — 0,42; r_0 — начальный радиус скважины, соответствующий значениям $p_н$ и $Az_н$ на графике зависимости $\Delta r = f(P)$ см (рис. 2.3.2); Δp — приращение давления на стенки скважины в пределах прямолинейного участка графика зависимости $\Delta r = f(P)$ кгс/см²; Δr — приращение радиуса скважины вследствие деформации горных пород под действием нагрузки Δp, см.

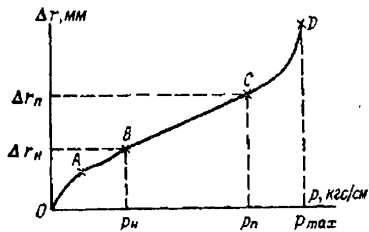


Рис. 2.3.2. График зависимости деформаций горных пород от действующей нагрузки при прессиометрических испытаниях: *OA* — расширение камеры прессиометра до соприкосновения со стенками скважины; *AB* — обжатие неровностей поверхности стенок скважины; *BC* — уплотнение породы под действием бокового давления (фаза уплотнения пород); *CD* — заметное развитие сдвигов в породе (фаза заметного разрушения породы); $\Delta r_п$ $\Delta r_н$ — приращения радиуса прессиометра и давления, соответствующие пределу пропорциональности деформаций горных пород от действующего давления

Так как в гидравлических прессиометрах о приращении их радиуса и соответственно радиуса скважины судят по изменению объема рабочей камеры прессиометра, модуль общей деформации можно вычислять также по формуле:

$$E_0 = (1+\mu)\lambda\frac{\Delta p}{\Delta V},$$

где ΔV — приращение объема рабочей камеры прессиометра вследствие деформации горных пород под действием нагрузки Δp, см³; K — коэффициент, постоянный для данного прессиометра, см³.

Многочисленные сопоставления результатов прессиометрических испытаний песчаных и глинистых пород с результатами их испытаний пробными

статическими нагрузками показали, что значение модуля общей деформации, определяемое по первому методу, всегда меньше, чем по второму. Поэтому ГОСТ 20276-74 рекомендует учитывать корректирующий коэффициент и вычислять модуль общей деформации по формуле:

$$E_0 = K_0 \frac{\Delta p}{\Delta r},$$

где K — корректирующий коэффициент, определяемый по специальной формуле или по данным параллельных испытаний горных пород пробной статической нагрузкой.

При проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений III–IV классов этот коэффициент для песчаных и глинистых пород можно принимать: при испытаниях на глубине меньше 5 м равным 3,0; от 5 до 10 м — 2,0; от 10 до 20 м — 1,5. Так как прессиометр можно устанавливать на разной глубине, деформационные свойства горных пород можно исследовать по всему геологическому разрезу, вскрытому скважиной, т. е. каждый слой, зону, подзону и т. д.

Прессиометрический метод применим для исследования деформационных свойств любых горных пород: скальных, полускальных, рыхлых несвязных и мягких связных, но наиболее часто его применяют при изучении свойств песчаных и глинистых пород. На графике, выражающем зависимость $\Delta r = f(p)$ (см. рис. 2.3.2), обычно выделяются два участка, отражающие различные стадии деформации горных пород под воздействием на них нагрузки. Первый участок *BC* соответствует стадии их уплотнения и практически выражает линейную зависимость деформации от нагрузки. Давление p_n — предел пропорциональности — является пределом возможного использования линейной зависимости деформации горных пород. По первому участку кривой и вычисляют значение модуля общей деформации. Второй участок *CD* характеризует криволинейную зависимость развития деформации горных пород и означает начало и развитие их разрушения в зоне действия нагрузки. Давление p_{max} является пределом прочности горных пород.

В настоящее время известно достаточно много конструкций прессиометров. Идея этого прибора и методика испытаний горных пород в скважинах были предложены в 1930 г. русским инженером путей сообщения А. А. Ктаторовым. В 1933 г. немецкий инженер Ф. Кеглер предложил две конструкции прибора бокового давления и теоретическое решение для определения модуля общей деформации горных пород по данным испытаний такими приборами. В 1957 г. французский инженер Л. Менар обосновал методику исследований деформационных свойств горных пород в скважинах и создал для

этого прибор более совершенной конструкции, который назвал прессиометром. В 1963 г. Л. Менар основал фирму «Прессиометр», выполняющую исследования горных пород в самых различных странах мира. Прессиометр Л. Менара пользуется очень широкой известностью (рис. 2.3.3).

В России наиболее широко применяются прессиометры конструкции ГПИ «Фундаментпроект» Уральского политехнического института им. С. М. Кирова (рис. 2.3.4), ВСЕГИНГЕО (рис. 2.3.5), НИИ оснований и подземных сооружений, ЦНИИС Минтрансстроя, ВНИИМОРГЕО, ВНИИгидротехники им. Веденеева (рис. 2.3.6). В разработке современных теоретических основ прессиометрического метода и конструкций приборов принимали участие Г. К. Бондарик, Л. Г. Мариупольский, К. В. Руппенейт, М. И. Бронштейн, Ю. Г. Трофименков, В. Д. Мушников, В. Г. Елпатов, С. Л. Коренева, Г. П. Корчагин и др.

Каждый прессиометр состоит из собственно прессиометра — цилиндра-камеры, устанавливаемой непосредственно в скважине, измерительной аппаратуры, включающей технические устройства для подачи давления (нагрузки) в рабочую камеру прессиометра, и приборов для измерения давления и деформаций горных пород. Прессиометр и измерительная аппаратура связаны между собой шлангами, а некоторые из них еще и электрическими проводами.

В зависимости от способа создания усилий (давления) в рабочей камере прессиометры бывают гидравлического или пневматического действия. При этом измерения деформаций горных пород производят либо по изменению объема рабочей камеры, либо по изменению ее диаметра

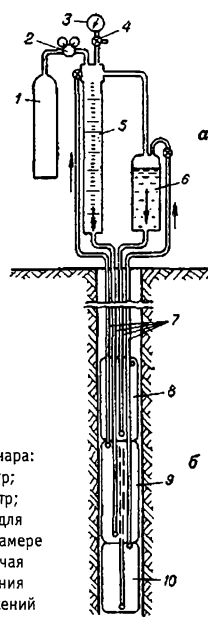


Рис. 2.3.3. Схема прессиометра конструкции Л. Менара:
а — измерительная аппаратура; *б* — прессиометр;
1 — газовый баллон; 2 — редуктор; 3 — манометр;
4 — кран-тройник; 5 — измерительный цилиндр для измерения изменений объема жидкости в рабочей камере прессиометра; 6 — бачок; 7 — шланги; 8 — рабочая камера; 9 — пригрузочные камеры для поддержания вокруг рабочей камеры равномерного поля напряжений

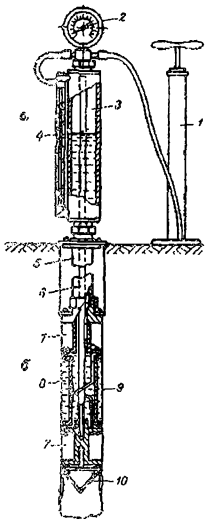


Рис 2.3.4. Схема прессиометра конструкции Уральского политехнического института им. С.М. Кирова П-89: *а* — измерительное устройство; *б* — прессиометр; 1 — автомобильный насос; 2 — манометр; 3 — резервная емкость; 4 — трубка для изменения объема рабочей камеры; 5 — наружная соединительная трубка; 6 — внутренняя соединительная трубка; 7 — пригрузочные камеры; 8 — рабочая камера; 9 — резиновая оболочка; 10 — стыковой конус для защиты оболочки от разрыва

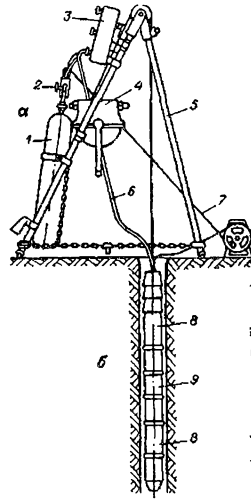


Рис. 2.3.5. Схема прессиометра конструкции ВСЕГИНГЕО ИГП-21: *а* — измерительная аппаратура; *б* — прессиометр; 1 — баллон сжатого воздуха; 2 — редуктор давления; 3 — блок управления, включающий электрический указатель деформаций и манометр; 4 — лебедка; 5 — штатив; 6 — шланг высого давления; 7 — электрические провода; 8 — пригрузочные камеры; 9 — рабочая камера

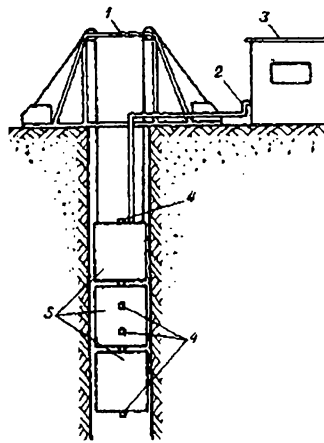


Рис. 2.3.6. Схема прессиометра марки ЦГШ конструкции Института гидротехники им. Веденеева: 1 —подъемник; 2 — гидравлическая магистраль; 3 — измерительная станция; 4 — дефомометры; 5 — цилиндрические гидравлические штампы

(радиуса) с помощью электрических датчиков, устанавливаемых внутри рабочей камеры. От датчиков по электрическим проводам производится дистанционная передача и автоматическая запись деформаций на ленточной диаграмме. Таким образом, в зависимости от особенностей работы прессиометры принято подразделять на гидравлические и пневмоэлектрические.

При подготовке к прессиометрическим испытаниям необходимо детально изучить геологический разрез по каждой опытной скважине и геологически обосновать выделение слоев, зон или подзон горных пород, подлежащих испытаниям. Выделение интервалов для испытаний должно основываться на полном учете особенностей геологического разреза горных пород, вскрытых скважиной, глубины заложения фундаментов сооружений и распределения напряжений в их основании. Испытаниям подлежат главным образом те слои и зоны горных пород, которые попадают в зону влияния сооружения.

Прессиометрическим испытаниям наиболее часто подвергаются разнообразные песчаные и глинистые породы, поэтому в соответствии с техническими данными прессиометров диаметр скважин должен быть от 76 до 127 мм, т. е. на 10–20 мм больше, чем внешний диаметр прессиометра, а глубина до 15 м, редко более. Бурение надо производить способами, обеспечивающими полную сохранность естественного сложения и физического состояния горных пород в стенках скважины. Если в геологическом разрезе преобладают породы устойчивые, бурение скважин производят без обсадки и испытание пород проводят после окончания бурения, начиная с нижних горизонтов. Если

в геологическом разрезе преобладают неустойчивые породы, их испытание производят в процессе бурения. В этом случае скважину бурят с обсадкой трубами до необходимой глубины, на которую опускают прессиометр. Затем обсадные трубы поднимают и производят обжатие пород в стенках скважины. В такой последовательности исследуют деформационные свойства пород в процессе бурения скважины.

Испытания каждого слоя, зоны и подзоны пород производят возрастающими ступенями нагрузки по 0,1–0,25 кгс/см^2, если они имеют малую и среднюю плотность, и по 0,5–1,0 кгс/см^2 — при плотном сложении. Каждая ступень давления создается в течение 1–2 минут и выдерживается до условной стабилизации деформации, т. е. когда она не превышает 0,1 мм за 30 минут у песчаных пород и за 1 ч – у глинистых. Наблюдения за деформациями производят в первые 15 минут в песчаных породах и 30 минут — в глинистых соответственно через каждые 5 и 10 минут и впоследствии соответственно через каждые 15 и 30 минут до условной стабилизации деформаций.

При определении давления на стенки скважины при работе с гидравлическим прессиометром рекомендуется к давлению, измеренному манометром, добавлять давление столба воды от уровня манометра до середины рабочей камеры прессиометра. При установке гидравлического прессиометра на глубине более 10–15 м этот столб воды может создать значительное давление на стенки скважины, когда еще невозможно измерить деформацию пород. В слабых породах эти деформации могут быть значительными. Поэтому гидравлические прессиометры нецелесообразно применять при испытаниях пород на значительных глубинах и особенно в слабых, податливых породах.

Для получения более точных данных измерений прессиометры необходимо отградуировать, так как давление, создаваемое в рабочей камере прибора, расходуется не только на обжатие горных пород, но и на деформацию прибора. Описание способов градуировки прессиометров приводится в соответствующих руководствах.

Документация прессиометрических испытаний горных пород выполняется в журналах специальной формы.

Глава 2.4. ИСПЫТАНИЕ НА СРЕЗ

Исследование сопротивления горных пород сдвигу в скважинах по методу вращательного среза

В природе широко распространены слабые горные породы, такие как мягкие глинистые неустойчивой консистенции, мелкозернистые и тонкозернистые водоносные пески рыхлого сложения, торфа, гумусированные и заторфованные слабые песчаные и глинистые, илы и др. Из таких пород трудно, а иногда и невозможно отобрать пробы для лабораторных исследований сопротивления их сдвигу, так же как и испытать их в полевых условиях в приборах и установках по методу плоского сдвига (см. выше). Поэтому исследование сопротивления их сдвигу производят главным образом в скважинах с применением лопастных приборов.

Этот метод впервые был применен в Швеции, затем в Канаде и известен как метод Vane test, теперь он получил распространение во многих странах. В Советском Союзе и в России исследования сопротивления сдвигу слабых отложений в скважинах с применением лопастных приборов получили широкое распространение. Сущность этого метода состоит в измерении максимального крутящего момента, необходимого для вращения крыльчатки — четырехлопастного прибора, погруженного (задавленного) в породу, по цилиндрической поверхности (рис. 2.4.1).

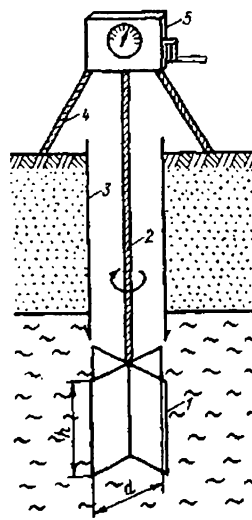


Рис. 2.4.1. Схема исследования сопротивления сдвигу слабых пород в скважинах с применением лопастного прибора: 1 — лопастный прибор — крыльчатка; 2 — штанги; 3 — обсадные трубы; 4 — станина; 5 — измерительное устройство прибора с приводом для вращения крыльчатки; h — высота крыльчатки; d — диаметр крыльчатки

Поэтому его называют методом вращательного среза. На рисунке видно, что при вращении крыльчатки происходит срез пород по цилиндрической поверхности высотой h и диаметром d. Сопротивление сдвигу при этом равно

$$\tau = \frac{M_{max}}{K},$$

где τ — сопротивление горных пород сдвигу, кгс/см^2; M_{max} — максимальный крутящий момент, кгс·см^2; K — постоянная крыльчатки (см^3), зависящая от ее высоты и диаметра.

$$K = \frac{\pi d^2 h}{2}\left(1 + \frac{d}{3h}\right).$$

Из этого следует, что по этому методу устанавливают общее сопротивление пород сдвигу τ, но он не позволяет найти раздельно составляющие его величины — угол внутреннего трения φ и сцепление C. Сопротивление сдвигу мягких глинистых пород определяется главным образом силами сцепления, так как внутреннее трение в них очень мало, а песчаных — только внутренним трением, так как силы сцепления в них практически равны нулю.

На рисунке 2.4.2 видно, что по мере поворота крыльчатки при вращательном срезе постепенно возрастает крутящий момент и достигает максимального

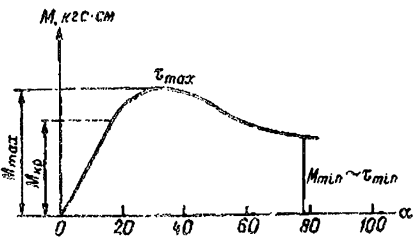


Рис. 2.4.2. График изменения крутящего момента M в зависимости от угла поворота крыльчатки a при исследованиях сопротивления сдвигу горных пород в скважинах лопастным прибором: $M_{кр}$ — крутящий момент, соответствующий пределу пропорциональности; M_{max} — максимальный крутящий момент, соответствующий сопротивлению горных пород сдвигу в естественном сложении, равный $\sim\tau_{max}$; M_{min} — минимальный крутящий момент, соответствующий сопротивлению горных пород сдвигу в нарушенном сложении, равный $\sim\tau_{min}$

значения при максимальном сопротивлении сдвигу пород естественного сложения. Когда по цилиндрической поверхности среза, например в глинистых породах, силы сцепления (структурные связи) будут нарушены, значение крутящего момента будет минимальным. Это соответствует минимальному значению сопротивления пород сдвигу, т. е. сдвиг произойдет по образовавшейся цилиндрической поверхности пород нарушенного сложения — поверхности ослабления.

Для того чтобы определить влияние нарушения естественного сложения и структурных связей глинистых пород на их физическое состояние и прочность, оценивают их чувствительность. Мерой (индексом) чувствительности глинистых пород является отношение прочности породы естественного сложения к прочности той же породы нарушенного сложения.

$$I_F = \frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} = \frac{M_{max}}{M_{min}},$$

где I_F — показатель (индекс) чувствительности глинистой породы; τ_{max} — сопротивление сдвигу породы естественного сложения; τ_{min} — сопротивление сдвигу породы нарушенного сложения; M_{max} и M_{min} — соответствующие значения крутящего момента.

Как отмечают К. Терцаги и Р. Пек (1958 г.), у большинства глинистых пород значение I_F находится в пределах от 2 до 4, у чувствительных пород — от 4 до 8, у очень чувствительных глин этот показатель достигает десятков и даже сотен единиц. Г. К. Бондарик (1967 г.) рекомендует для оценки влияния нарушения естественного сложения глинистых пород на изменение их прочности пользоваться величиной, обратной чувствительности, т. е.

$$I_c = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}},$$

где I_c — показатель структурной прочности породы; τ_{min} и τ_{max} — сопротивление сдвигу — прочность породы соответственно нарушенного и естественного сложения.

По показателю структурной прочности глинистые породы подразделяются на 4 группы:

1) ничтожно малая (I_c = 1);
2) низкая (I_c = 0,5 1);
3) средняя (I_c = 0,2 0,5);
4) высокая (I_c = 00,2).

При вращательном срезе на угол поворота крыльчатки a может влиять деформация (закручивание) штанг, и тем больше, чем больше их длина. Чтобы исключить влияние этого фактора, вводят поправку $\Delta\alpha$, устанавливаемую градуировкой снаряда. При выполнении исследований слабых пород до глубины 10–15 м эта поправка мала, и при полной исправности снаряда ее можно не учитывать. Поэтому исследование пород в скважинах лопастным прибором целесообразно выполнять до глубины 10–15 м.

В России для таких исследований наиболее широко применяют приборы конструкции ЦНИИС Минтрансстроя (рис. 2.4.3), ГПИ «Фундаментпроект» (рис. 2.4.4), Калининского политехнического института (рис. 2.4.5) и др.

На рисунке 2.4.3 видно, что каждый прибор для вращательного среза пород в скважинах состоит из крыльчатки, штанг и измерительно-вращательного устройства. В большинстве конструкций приборов измерительно-вращательное устройство смонтировано на специальном штативе.

Исследования сопротивления пород сдвигу по методу вращательного среза целесообразно проводить в процессе бурения скважины. В этом случае исключается необходимость учитывать влияние трения штанг о породы при их вращении. Однако очень слабые отложения, такие как илы, торф, водонасыщенные породы, можно исследовать и без бурения скважин. При исследовании пород в скважинах их бурение чередуют

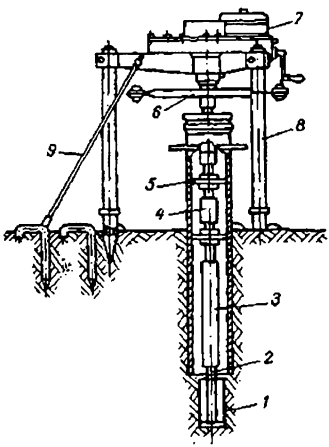


Рис. 2.4.3. Установка для исследования сопротивления горных пород сдвигу УИГС-2 конструкции ЦНИИС Минтрансстроя: 1 — крыльчатка; 2 — стержень, несущий крыльчатку; 3 — штанги; 4 — соединительная муфта; 5 — центрирующая муфта; 6 — подвеска; 7 — измерительное и вращательное устройство; 8 — штатив прибора; 9 — тросовые оттяжки для дополнительного крепления прибора

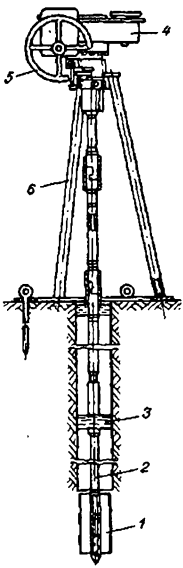


Рис. 2.4.4. Установка СП-52 для испытания горных пород на сдвиг в скважинах, конструкции ГПН «Фундамент-проект»: 1 — крыльчатка; 2 — штанга; 3 — центрирующие муфты; 4 — измерительное и вращательное устройство; 5 — штурвал; 6 — штатив

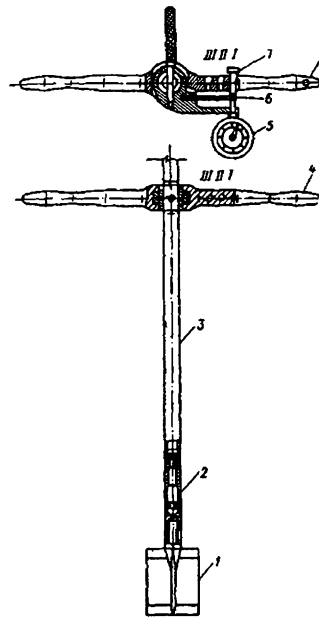


Рис. 2.4.5. Лопастной прибор-крыльчатка конструкции Калининского политехнического института (марки СК-8): 1 — крыльчатка; 2 — зубчатое устройство для отключения крыльчатки от штанг при измерении трения штанг о породу; 3 — штанги; 4 — рукоятка с измерительным устройством; 5 — индикатор часового типа; 6 — пластина упругая; 7 — винт, изменяющий чувствительность прибора в зависимости от его положения (I, II, III)

с остановками для испытания пород крыльчаткой. Исследования проводят либо через равные интервалы по глубине (через 0,5; 1,0; 1,5 м), либо на определенных глубинах с целью испытания отдельных слоев, зон и подзон пород.

При исследованиях пород по методу вращательного среза, как и при выполнении любых других опытных работ, необходимо иметь точное представление о геологическом разрезе исследуемого участка. Приступая к опытным работам, предварительно устанавливают, какие слои, зоны, подзоны и на каких глубинах будут испытываться крыльчаткой. В соответствии с этим устанавливают необходимую длину штанг и глубину опускания крыльчатки. В зависимости от прочности пород выбирают и размер крыльчатки. В слабых породах (сопротивление сдвигу до 0,5 кгс/см^2) обычно применяют крыльчатки диаметром 75–100 мм. В более прочных (сопротивление сдвигу до 1,0 кгс/см^2) применяют крыльчатки диаметром 55–65 мм. В породах с сопротивлением сдвигу более 1,0 кгс/см^2 применять лопастные приборы нецелесообразно.

В соответствии с выбранным размером крыльчатки определяют и диаметр опытной скважины, бурение которой в неустойчивых породах производят с креплением обсадными трубами, а в устойчивых — без него. Погружение крыльчатки на забой скважины в слабые породы обычно происходит под действием веса штанги, а в более плотные породы ее задавливают. Породы на забое скважины должны находиться в естественном сложении и физическом состоянии, т. е. не нарушенном при бурении. С этой целью крыльчатку целесообразно погружать в породы на глубину не менее 0,3–0,5 м ниже забоя скважины. При погружении крыльчатки штанги необходимо ориентировать строго по отвесу. Соответствующим образом располагают на поверхности земли измерительно-вращательное устройство. Зафиксировав показания измерительных устройств, производят вращение крыльчатки со скоростью, равной 0,1–0,2 градус/сек. Такая скорость близка к скорости испытания пород на сдвиг в лабораторных условиях по методике быстрого сдвига.

Глава 2.5. СТАТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Исследование плотности и прочности горных пород методами зондирования

В настоящее время при инженерных изысканиях широкое применение получили методы статического и динамического зондирования. Это очень простые методы исследований преимущественно песчаных и глинистых пород, дающие широкую информацию об их плотности, прочности, деформационных свойствах и однородности. Кроме того, с помощью этих методов можно устанавливать изменение геологического разреза по глубине, выявлять глубину залегания и мощность слабых слоев и зон плотных, прочных и коренных пород, а также изменение степени уплотнения и упрочнения искусственно отсыпанных или намытых пород во времени. Методы зондирования позволяют получать необходимые данные для проектирования и оценки условий строительства свайных фундаментов, шпунтовых ограждений и других видов строительных работ.

Опыты состоят в задавливании или забивании в горные породы зонда с коническим наконечником (редко грунтонос-пробоотборника). При статическом зондировании зонд задавливается в породы, при динамическом — забивается. По тем сопротивлениям, которые оказывают горные породы проникновению в них зонда, судят об их плотности, прочности и других свойствах. Естественно, что такие исследования горных пород не являются достаточно точными, они дают предварительные, главным образом приближенные представления об их свойствах. При сочетании методов зондирования с другими видами геологических работ результативность их, т. е. точность и достоверность, значительно повышаются.

Статическое и динамическое зондирование — это полевые экспресс-методы, для интерпретации результатов которых на предварительных стадиях изысканий их надо обязательно сочетать с разведочными работами — геофизическими и горно-буровыми, а на детальных — использовать в качестве дополнительных с целью повышения детальности изысканий в целом и решения специальных вопросов (например, при проектировании свайных фундаментов и др.).

ГОСТы 20069-74 и 19912-74 и «Указания по зондированию горных пород для строительства» (СН 448-72) рекомендуют при инженерных изысканиях для конкретных зданий и сооружений зондирование производить в пределах их контуров или не более чем в 5 м от них. Для получения сопоставимых данных часть точек зондирования рекомендуется располагать на расстояниях не более 5 м

от разведочных выработок, из которых производят отбор монолитов горных пород для лабораторных исследований и выполняют другие полевые исследования. Практика показывает, что данные зондирования необходимо рассматривать совместно с данными, получаемыми при бурении скважин и проходке горных выработок. Этого требуют ГОСТы 20069-74 и 19912-74. Глубину зондирования определяют, исходя из необходимости исследования определенной толщи горных пород как оснований зданий и сооружений. Предельная глубина зондирования не должна превышать 20 м. Область применения статического и динамического зондирования в зависимости от вида и физического состояния горных пород регламентируется данными, приведенными в таблице 2.5.1.

Таблица 2.5.1

Область применения статического и динамического зондирования по СН 448-72

Вид и физическое состояние горных пород	Способ зондирования	
	статический	динамический
Песчаные: крупно-, средне-, мелко- и тонкозернистые влажные и маловлажные;	Допускаются	
крупно-, средне- и мелкозернистые водоносные;	»	
тонкозернистые пылеватые водоносные	Допускается	Не допускается*
Глинистые (супеси, суглинки и глины): твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции;	Допускаются	
мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции	Допускается	Не допускается *
Песчаные и глинистые с содержанием крупнообломочного материала	Не допускаются	
	более 25%	более 40%
Песчаные водоносные	При определении динамической устойчивости	
	Не допускается*	Допускается
Все виды горных пород в мерзлом состоянии	Не допускаются	
Скальные и полускальные	»	
Крупнообломочные	»	

* Допускается по специально разработанной методике при проведении экспериментальных работ.

При статическом зондировании основными показателями свойств горных пород являются:

а) общее сопротивление зондированию $R_{общ}$, кгс;

б) сопротивление погружению конуса $R_{кон}$, кгс/см^2;

в) удельное сопротивление погружению конуса $R_{уд.\ кон}$, кгс/см^2;

г) сопротивление трению по боковой поверхности зонда $R_{тр}$, кгс/см^2.

Общее сопротивление горных пород — это то сопротивление, которое они оказывают проникновению зонда. Оно равно тому усилию (кгс), которое передается зонду гидравлическим домкратом или весом груза. При использовании современных гидравлических установок оно равно

$$R_{общ} = pF_ц,$$

где p — показание манометра, отражающее давление в цилиндре гидравлического домкрата, кгс/см^2; $F_ц$ — площадь поршня гидравлического домкрата, см^2.

Часть усилий, расходуемых на вдавливание зонда, расходуется на преодоление сил трения между зондом и породой. Если исключить эти сопротивления, получим сопротивление горных пород, оказываемое непосредственно проникновению конуса, т. е. сопротивление погружению конуса $R_{кон}$

$$R_{кон} = R_{общ} - R_{тр}.$$

Современные установки для статического зондирования позволяют производить измерение общего сопротивления зондированию по показаниям манометра, а сопротивления проникновению конуса — по показаниям динамометра и индикаторов часового типа.

Удельное сопротивление статическому зондированию конусом равно

$$R_{уд} = \frac{R_{кон}}{F_к},$$

где $F_К$ — площадь поперечного сечения конуса, см^2.

Удельное сопротивление — это сопротивление горных пород проникновению конуса, приходящееся на единицу его поперечного сечения.

Сопротивление горных пород трению по боковой поверхности зонда равно

$$R_{тр} = R_{общ} - R_{кон}.$$

Современные конструкции установок для статического зондирования позволяют измерять либо общее сопротивление горных пород и сопротивление их погружению конуса, либо сопротивление проникновению конуса и величину трения по боковой поверхности зонда.

При динамическом зондировании горных пород основными показателями являются:

а) показатель динамического зондирования *N;*

б) глубина погружения зонда от определенного числа ударов стандартного молота S (это число ударов принято называть залогом);

в) условное динамическое сопротивление горных пород $R_д$, кгс/см^2 (по ГОСТ 19912-74 обозначается $p_д$, т. е. не так, как оно обозначается международными индексами).

Показателем динамического зондирования принято называть деленную глубину. В России эта глубина принята равной 10 см. Отсюда показатель динамического зондирования равен

$$N = \frac{10n}{S},$$

где n — число ударов в залоге; S — глубина погружения зонда от принятого числа ударов молота в залоге.

Показатель динамического зондирования зависит не только от сопротивления, оказываемого горными породами проникновению зонда, но и от сил трения, развивающихся по боковой поверхности зонда при его погружении, и от увеличения его веса с глубиной. Поэтому при обработке результатов испытаний вводят соответствующие поправки на боковое трение пород и на увеличение веса зонда. Эти поправки приводятся в методических руководствах.

Основным показателем свойств горных пород при динамическом зондировании считается условное динамическое сопротивление горных пород $R_д$. Только этот показатель предлагается ГОСТ 19912-74 и «Указаниями по зондированию горных пород для строительства» (СН 448-72). Его вычисляют по формуле:

$$R_д = \frac{K\Pi_o \Phi n}{S},$$

где K — коэффициент для учета потерь энергии при ударе, определяемый по специальной таблице; $П_о$ — коэффициент для учета влияния применяемого оборудования, определяемый по специальной таблице; $Ф$ — коэффициент для учета трения штанг о горные породы, определяемый по данным двух испытаний, в одном из которых зондирование производится в процес-

се бурения; n — число ударов в залоге; S — глубина погружения зонда от принятого числа ударов молота в залоге.

Для статического и динамического зондирования применяют разнообразные установки и станки. В Советском Союзе для статического зондирования наиболее часто использовались установки конструкции ГПИ «Фундаментпроект» марки С-979, БашНИИпромстроя марки С-832 (рис. 2.5.2) и ВСЕГИНГЕО марки СПК. Известны установки конструкции и других организаций.

Установка статического зондирования С-979 (рис. 2.5.1) выпускалась Московским заводом строительных машин. Она смонтирована на двух одноосных шасси: на первом сама установка, на втором — маслонасосная станция. Сама установка состоит из следующих основных частей:

1) зонда, представляющего собой штангу диаметром 36/20 мм, внутри которой перемещается стержень диаметром 18 мм с коническим наконечником в нижней части; диаметр основания наконечника 36 мм, площадь 10 см^2, угол при вершине 60°; эта конструкция зонда позволяет измерять раздельно общее сопротивление горных пород статическому зондированию и их сопротивление погружению конуса; сопротивление горных пород трению по боковой поверхности зонда определяется по разности;
2) задавливающего устройства, в свою очередь состоящего из двух трубчатых направляющих стоек, соединенных верхней и нижней траверсами, и гидравлического домкрата грузоподъемностью 10 т, укрепленного на верхней траверсе и соединяющегося шлангом с маслонасосной станцией;
3) измерительной аппаратуры, включающей измерительную головку с динамометром часового типа, рассчитанным на максимальное усилие 5 тс, манометр и мерную рейку; манометром измеряют общее сопротивление зондированию, динамометром — сопротивление погружению конуса, рейкой — перемещение зонда при его задавливании;
4) рамы на одноосном шасси, на которой смонтированы вся установка и два комплекта винтовых анкерных свай; один комплект используют при испытаниях горных пород задавливанием, второй подготавливают для зондирования на следующей точке.

Установка С-832 конструкции БашНИИпрома смонтирована на автомобиле ГАЗ-63 или ЗИЛ-157 (рис. 2.5.2). Зонд и две анкерные винтовые сваи погружаются в горные породы гидравлическими домкратами. Гидравлический домкрат для задавливания зонда установлен на мачте, поднимающейся в рабочее положение из транспортного гидравлическим устройством. Диаметр штанг

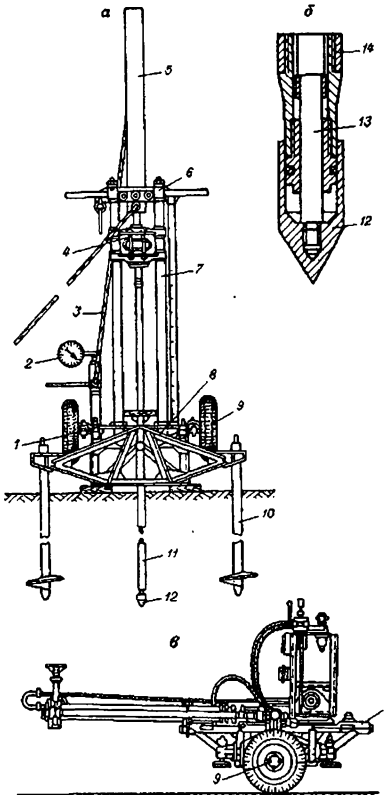


Рис. 2.5.1. Установки С-979 конструкции ГПИ «Фундаментпроект» для производства статического зондирования:
а — рабочее положение; *б* —конический наконечник; *в* — транспортное положение установки (без маслонасосной станции); 1 — рама; 2 — манометр; 3 — шланг; 4 — измерительная головка с динамометром и индикатором часового типа; 5 — гидравлический домкрат; 6 — верхняя траверса; 7 — направляющие стойки; 8 — нижняя траверса; 9 — шасси; 10 — винтовые анкерные сваи; 11 — зонд; 12 — конический наконечник; 13 — внутренний стержень; 14 — наружная штанга зонда

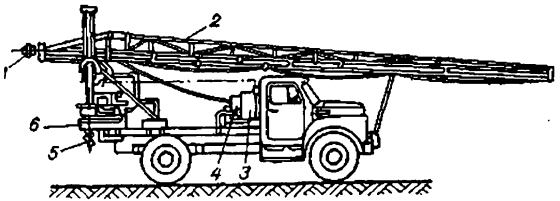


Рис. 2.5.2. Установка С-832 конструкции БашНИИпрома для производства статического зондирования (в транспортном положении): 1 — зонд; 2 — подъемная мачта; 3 — гидравлическая система; 4 — электрооборудование; 5 — анкерная винтовая свая; 6 — упорная траверса

зонда — 34 мм, площадь основания конического наконечника — 10 см^2, угол при вершине конуса — 60°. Конструкция зонда позволяет измерять раздельно сопротивление горных пород погружению конуса и сопротивление их трению по боковой поверхности зонда. Все измерения производятся датчиками, соединенными с самопишущими приборами электрическими проводами. Питание измерительной системы осуществляется от аккумулятора.

При динамическом зондировании зонд с коническим наконечником забивают в горные породы ударами молота. Стандартный зонд состоит из штанг диаметром 42 мм и конуса с диаметром в основании 74 мм и углом при вершине 60°. Конус на штанге навинчивают (инвентарный конус) или свободно надевают и крепят шпилькой (съемный конус), которая при подъеме штанг срезается, и конус остается в породе. Погружение конуса осуществляется ударами молота массой 60 кг, сбрасываемого с высоты 80 см.

При испытаниях горных пород динамическим зондированием, как и статическим, применяют разнообразные установки и станки. В Советском Союзе для этих целей широко использовались установки УБП-15 или УБП-15м конструкции Гидропроекта (рис. 2.5.3). Кроме этих применяют установки с автоматическим устройством для регистрации числа ударов молота и глубины погружения зонда (конструкции НИИОПС) и для подъема и сбрасывания молота (конструкции Киевгипротранса). Эстонпроектом сконструирована и многими организациями применяется легкая переносная установка для динамического зондирования. При работе с этой установкой подъем и сбрасывание молота осуществляются вручную. Наконец, в ряде случаев для динамического зондирования успешно применяют буровые станки ударного действия — УГБ-50 и

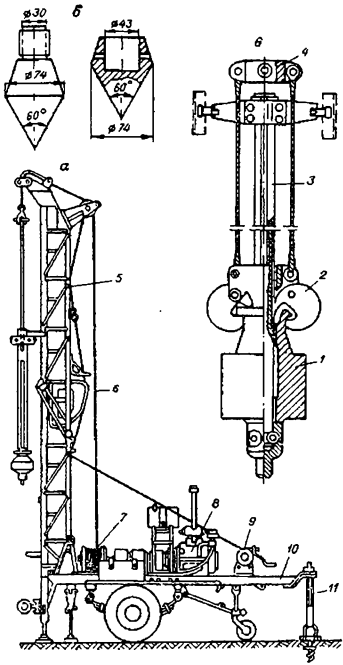


Рис. 2.5.3. Установка УБП-18 конструкции Гидропроекта для производства динамического зондирования: *а* — установка в рабочем положении; *б* — конические наконечники инвентарный и съемный; *в* — навесное устройство для подъема и сбрасывания ударного молота; 1 — ударный молот; 2 — кулачки для захвата и сбрасывания молота; 3 — направляющая штанга; 4 — траверса для подъема молота; 5 — мачта; 6 — трос; 7 —лебедка; 8 — двигатель; 9 — ручная лебедка; 10 — рама; 11 — опоры

БУКС-ЛГТ, для которых изготавливают навесные приспособления для подъема и сбрасывания молота при забивке зонда.

Требования, предъявляемые ГОСТами 20069-81 и 19912-81 к установкам для статического и динамического зондирования, приведены в таблицах 2.5.2 (*а, б*). Как видно из этих таблиц, для статического зондирования применяют

Таблица 2.5.2а

Требования к установкам для статического зондирования (ГОСТ 20089-81)

Состав оборудования и его характеристика	Основные параметры оборудования
Наконечник зонда: геометрическая форма	Конус с углом при вершине 60°
диаметр основания конуса, мм	36
образующая конуса, мм	36
Штанга зонда: диаметр, мм	36
длина звена, мм	1000
Задавливающее устройство: скорость погружения зонда, м/мин.	0,2–2
скорость извлечения зонда, м/мин.	Не ограничивается
усилие задавливания зонда, тс	Не менее 10
Измерительное устройство: диапазон измеряемых усилий под конусом, тс	0.1–5
диапазон измеряемых усилий на зонд в целом	0,2–10
класс точности измерительных приборов, тс	0,6

Таблица 2.5.2, б

Требования к установкам для динамического зондирования (ГОСТ 19912-81)

Состав оборудования и его характеристика	Основные параметры оборудования в зависимости от его типа		
	Легкое	Основное	Тяжелое
Наконечник зонда: геометрическая форма	Конус с углом при вершине 60°		
диаметр основания конуса, мм	74		
Штанга зонда: диаметр, мм	42		
длина звена, мм	1500		
Ударное устройство: масса молота, кг	30	60	120
высота падения молота, см	40	80	100
Измерительное устройство: цена деления шкалы, см	1±0.1		

три типа оборудования установок, характеризующихся следующими значениями кинетической энергии молота при ударе:

1) легкое, применяемое при $R_д$ менее 7 кгс/см^2;
2) основное, применяемое при $R_д$ от 7 до 175 кгс/см^2;
3) тяжелое, применяемое при $R_д$ более 175 кгс/см^2.

При подготовке к испытаниям горных пород статическим и динамическим зондированием производят проверку исправности всего оборудования и соответствие его градуировочным данным. Плановое и высотное положение точек зондирования определяется инструментально.

При статическом зондировании глубину погружения зонда в горные породы определяют по мерной рейке или по ленте самописца, если установка оборудована автоматическим устройством. Сопротивление горных пород погружению зонда измеряют в процессе зондирования непрерывно, ориентировочно через каждые 0,2 м. Скорость погружения зонда должна

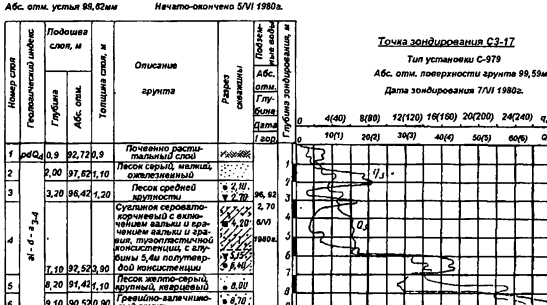


Рис. 2.5.4. График изменения удельных сопротивлений горных пород погружения конуса ($R_{уд.кон}$) и сопротивления горных пород трению по боковой поверхности зонда ($R_{тр}$) с глубиной по результатам статического зондирования: 1–3 — места отбора проб; 1 — горных пород нарушенного сложения; 2 — горных пород естественного сложения; 3 — грунтовой воды

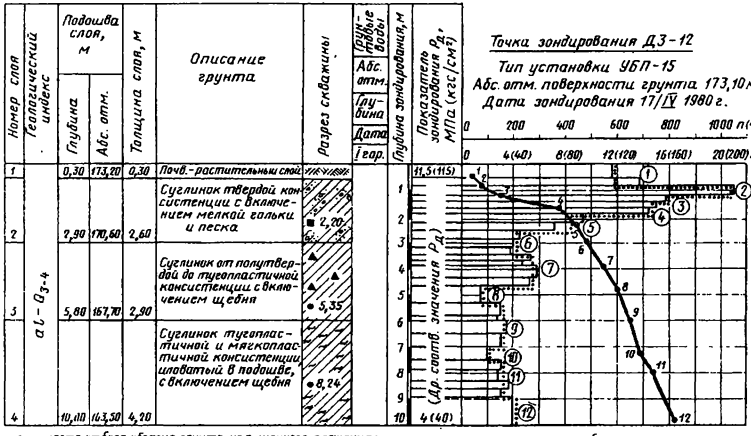


Рис. 2.5.5. График изменения условного динамического сопротивления горных пород ($R_д$) по результатам динамического зондирования: 1 — место отбора пробы горных пород нарушенного сложения; 2 — кривая изменения количества ударов нарастающим итогом; 3 — место отбора проб горных пород естественного сложения; 4 — значения $R_д$, осредненные по интервалам

быть около 1 м/мин. Остановки допускаются только для наращивания штанг.

Динамическое зондирование выполняют путем последовательной забивки зонда в горные породы свободно падающим молотом с измерением глубины погружения зонда от определенного числа ударов молота (залога). Эта глубина принята равной 10 см и измеряется с погрешностью ±0,5 см. Динамическое зондирование производят непрерывно до заданной глубины или до резкого уменьшения скорости погружения зонда (менее 2–3 см за залог). Перерывы в погружении зонда допускаются только для наращивания штанг.

При статическом и динамическом зондировании необходимо постоянно контролировать вертикальность погружения зонда. Все наблюдения при зондировании записывают в журналы определенной формы и результаты оформляют в виде графиков изменения показателей сопротивления зондированию ($R_{Общ}$, $R_{кон}$, $R_{уд.кон.}$ N, S или $R_Д$) с глубиной (рис. 2.5.3, 2.5.4). Как статическое, так и динамическое зондирования наглядно показывают изменение сопротивления горных пород с глубиной и соответственно изменение их плотности, прочности и др.

Таблица 2.5.3

Ориентировочные значения плотности сложения песков по данным статического зондирования (по СН 448-72)

Состав и состояние песков	Удельное сопротивлении погружению конуса $R_{уд\ кон}$, кгс/см^2	Плотность сложения песков
Крупно- и среднезернистые	>150 50–150 <50	Плотные Средней плотности Рыхлые
Мелкозернистые	>120 40–120 <40	Плотные Средней плотности Рыхлые
Тонкозернистые маловлажные	>100 30–100 <30	Плотные Средней плотности Рыхлые
Тонкозернистые водонасыщенные	>70 20–70 <20	Плотные Средней плотности Рыхлые

Таблица 2.5.4

Ориентировочные значения плотности сложения песков по данным динамического зондирования (по СН 448-72)

Состав и состояние песков	Условное динамическое сопротивление $R_д$, кгс/см^2	Плотность сложения песков
Пески естественного сложения: крупно- и среднезернистые, независимо от влажности	<35 35–125 >125	Рыхлые Средней плотности Плотные
мелкозернистые маловлажные	<30 30–110 >110	Рыхлые Средней плотности Плотные
тонкозернистые маловлажные и мелкозернистые водонасыщенные	<20 20-85 >85	Рыхлые Средней плотности Плотные
Пески свеженамытые (в первый месяц после намыва): мелко- и среднезернистые маловлажные	<35 35–110 >110	Рыхлые Средней плотности Плотные
мелко- и среднезернистые водонасыщенные	<20 20–85 >85	Рыхлые Средней плотности Плотные

Таблица 2.5.5

Ориентировочные данные о консистенции глинистых пород по данным статического зондирования (по Ю.Г. Трофименкову и Л.Н. Воробкову)

Удельное сопротивление глинистой породы погружению конуса $R_{уд\ кон}$, кгс/см^2	Консистенция
>50 30–50 10–30 <10	Твердая Полутвердая Тугопластичная Мягкопластичная и текучепластичная

Таблица 2.5.6а

Ориентировочные значения угла внутреннего трения песков крупно-, средне- и мелкозернистых по данным статического зондирования

Удельное сопротивление погружению конуса $R_{уд\ кон}$, кгс/см^2	Угол внутреннего трения (градусы) при глубине зондирования, м		
	<2	2–5	>5
10	28	27	26
20	30	29	28
40	32	31	30
70	34	33	32
120	36	35	34
200	38	37	36
300	40	39	38

Таблица 2.5.6б

Ориентировочные значения угла внутреннего трения песков по данным динамического зондирования (по СН 448-72)

Условное динамическое сопротивление $R_д$, кгс/см^2	Угол внутреннего трения песков, градусы		
	крупно- и средне-зернистых	мелкозернистых	тонкозернистых
20	30	28	26
35	33	30	28
70	36	33	30
110	38	35	32
140	40	37	34
175	41	38	35

Таблица 2.5.7а

Модуль общей деформации песчаных и глинистых пород по данным зондирования (по СН 448-72)

Горные породы	E_o, кгс/см^2
Пески	3 $R_{уд}$ (статическое)
Глины и суглинки	7 $R_{уд}$ (статическое)
Глины и суглинки	6 $R_д$ (динамическое)

Таблица 2.5.7б

Ориентировочные значения модуля общей деформации песков по данным динамического зондирования (по СН 448-72)

$R_д$, кгс/см^2	E_o, кгс/см^2 для песков		
	среднезернистых	мелкозернистых	тонкозернистых
20	160–200	130	60
35	210–260	190	130
70	340–390	290	220
110	440–490	350	280
140	500–550	400	320
175	550–600	450	350

Многолетний опыт исследований песчаных и глинистых пород позволил установить ориентировочные значения показателей их плотности (табл. 2.5.3, 2.5.4), консистенции (табл. 2.5.5), прочности (табл. 2.5.6, *а, б*) и деформационных свойств (табл. 2.5.7, *а, б*). Используя результаты этих исследований, необходимо помнить, что зондирование — это экспресс-методы, дающие возможность быстро получать предварительные ориентировочные представления о свойствах песчаных и глинистых пород. Поэтому его необходимо проводить в комплексе с другими видами работ и на основе сопоставления результатов параллельных исследований устанавливать корреляционные зависимости между сопротивлением горных пород определенных генетических и петрографических типов зондированию и другими их свойствами для конкретного участка или строительной площадки.

Глава 2.6. ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ ОПЫТНЫМИ СВАЯМИ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

Испытания грунтов опытными сваями малого сечения проводятся для решения тех же задач, что и испытания натурных свай. Опытные сваи малого сечения погружаются или устраиваются на ту же глубину, что и натурные сваи, и их основным отличием от последних является значительно меньшая площадь поперечного сечения.

Применительно к забивным сваям наиболее распространенные опытные сваи малого сечения именуются эталонными, и методы испытаний с их помощью стандартизированы (ГОСТ 24942-81). В последние годы опытные сваи малого сечения стали все чаще использоваться также при проектировании буронабивных свай [16].

2.6.1. Испытания грунтов эталонными сваями

При исследованиях грунтов для проектирования свайных фундаментов испытания грунтов эталонными сваями (для кратности в дальнейшем будем их именовать испытаниями эталонных свай) проводят применительно к висячим сваям и сваям-стойкам, опирающимся на крупнообломочные грунты, длиной до 12 м.

Эталонная свая представляет собой инвентарную составную металлическую трубу наружным диаметром 114 мм и длиной до 12 м, нижний конец которой закрыт коническим наконечником с углом при вершине 60° (рис. 2.6.1).

В зависимости от конструкции соединения конического наконечника со стволом (трубой) эталонные сваи подразделяются на три типа (рис. 2.6.2):

— с наконечником, наглухо соединенным со стволом сваи, для измерения общего сопротивления грунтов вдавливанию сваи (I тип);

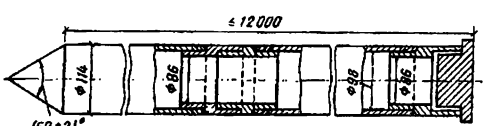


Рис. 2.6.1. Общий вид эталонной сваи

— с наконечником, свободно перемещающимся относительно ствола сваи, для последовательного измерения сопротивления грунтов под нижним концом и на боковой поверхности сваи (II тип);

— с наконечником, соединенным со стволом сваи через датчик усилия (электрический или механический), для одновременного измерения сопротивления грунтов под нижним концом и на боковой поверхности сваи (III тип).

Забивка эталонной сваи в грунт производится молотом массой 400 кг, падающим с постоянной высоты 150 см.

Для забивки свай могут применяться как специальные установки, снабженные всеми необходимыми механизмами и оборудованием для погружения сваи, их испытания статическими нагрузками и последующего извлечения из грунта, так и навесные установки к буровым станкам.

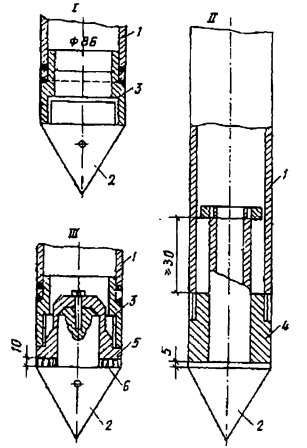


Рис. 2.6.2. Конструкции эталонных свай I, II и III типов: 1 — труба; 2 — наконечник; 3— ниппель; 4 — муфта; 5 — датчик усилия; 6 — прокладка

Навесная установка для забивки эталонных свай к буровому станку АВБ-2М разработана трестом «ТулаТИСИЗ». Общая масса навесного оборудовании составляет 760 кг, а управление его работой осуществляется с пульта управления бурового станка. Необходимые комплекты эталонных и анкерных свай, а также опорных конструкций помещаются в прицепе к буровому станку.

При проведении испытаний эталонных свай статическими нагрузками используются установки, состоящие из гидравлического домкрата грузоподъемностью 50–100 т с манометром, опорной конструкции (воспринимающей реактивные усилия от домкрата при вдавливании сваи) и реперной системы с приборами для измерения перемещений эталонной сваи.

Опорные конструкции подразделяются в зависимости от способа нагружения эталонной сваи и системы восприятия реактивных усилий на следующие:

установки, в которых упором для гидравлического домкрата служит система балок (ферм), прикрепленная к анкерным сваям;

то же, вантовая конструкция, прикрепленная к анкерным сваям;

то же, грузовая платформа;

установки комбинированные, в которых упором для гидравлического домкрата служит совместно грузовая платформа и система балок (ферм), прикрепленных к анкерным сваям.

Следует отметить, что практически почти во всех случаях применяются опорные конструкции первых двух типов, в которых реактивные усилия воспринимаются инвентарными анкерами в виде металлических труб или винтовых свай.

Одной из наиболее удачных в конструктивном отношении опорных конструкций I типа является установка МАУЭС-2-4, разработанная трестом «СевкавТИСИЗ» (рис. 2.6.3). Установка представляет собой сборно-разборную металлоконструкцию, состоящую из упорной балки 1, двух тяг 2, двух траверс 3, четырех анкеров 4, гидродомкрата 5, опорного столика 6 и реперной системы 7 с регистрирующими приборами 8. Установка рассчитана на максимальную вдавливающую нагрузку 300 кН и позволяет проводить испытания эталонных свай любого типа, причем последовательное нагружение нижнего конца и боковой поверхности сваи II типа может производиться без перемонтажа опорной конструкции с помощью специальной упорной гайки *9* на хвостовике опорного столика и вкладыша *10*.

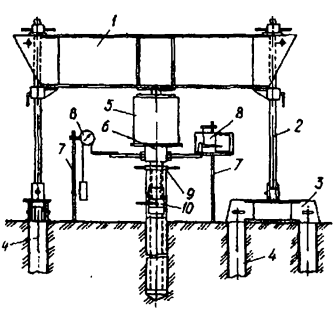


Рис. 2.6.3. Установка для испытания эталонных свай МАУЭС конструкции треста «СевкавТИСИЗ»

На рисунке 2.6.4 показан общий вид разработанной ГПИ «Фундаментпроект» опорной конструкции II типа, основными элементами которой являются: гидравлический домкрат 1, наклонные тяги 2 (шарнирно соединяющие оголовок 3 с анкерами 4) и горизонтальные тяги 5 (соединяющие анкеры с кольцевой рамой 6, воспринимающей горизонтальные составляющие нагрузок на анкеры).

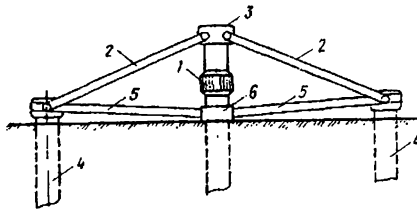


Рис. 2.6.4. Безбалочная установка для испытаний эталонных свай конструкции ГПИ «Фундаментпроект»

Эффективность применения эталонных свай, по сравнению с пробными сваями натурного размера, обусловливается следующими факторами:

- — возможность многократного использования этих свай при испытаниях;
- — значительно более легкое, мобильное и дешевое копровое оборудование для забивки;
- — более легкое и менее металлоемкое оборудование для испытаний свай статическими нагрузками;
- — меньшая продолжительность испытаний.

Испытания эталонных свай проводят последовательно динамическими и статическими нагрузками. Испытания динамическими нагрузками выполняются в процессе забивки свай в грунт свободно падающим молотом и состоят в измерении числа ударов молота на каждый метр ее погружения и на последнем метре на каждые 10 см. По данным этих испытаний подсчитываются общее число ударов молота и средние отказы сваи соответственно на каждом метре и на каждых 10 см последнего метра. Результаты представляются в виде графиков зависимости числа ударов N и отказов s_a от глубины погружения h, совмещенных с геологической колонкой ближайшей к месту испытания скважины (рис. 2.6.5).

Испытания эталонных свай статическими нагрузками проводят после «отдыха» путем их ступенчато-возрастающего приложения с выдержкой по времени на каждой ступени до условной стабилизации перемещений сваи.

Продолжительность «отдыха», величины ступеней нагрузок и критерии стабилизации перемещений регламентированы ГОСТ 24942–81 в зависимости от состава, свойств и состояния прорезаемых грунтов и грунтов под нижним концом свай. Для эталонных свай II типа после их испытания по указанной

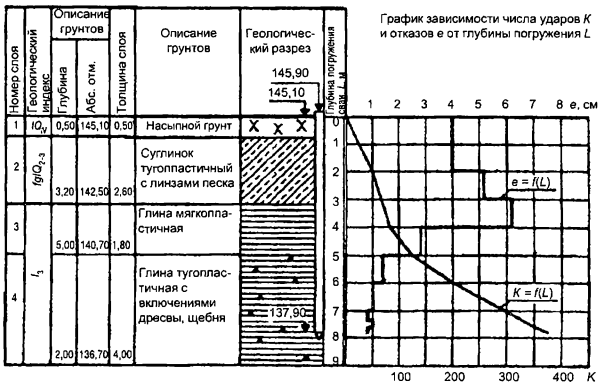


Рис. 2.6.5. Результаты испытания эталонной сваи динамическими нагрузками

методике проводят последовательное нагружение наконечника и ствола для оценки предельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности (по ГОСТ 24942–81).

Результаты испытаний эталонной сваи статическими нагрузками представляют в виде графиков зависимости осадки сваи s (а для свай II и III типов — также и отдельных ее элементов – наконечника и ствола) от нагрузки P и изменения величины осадки s во времени t по ступеням загружения (рис. 2.6.6).

В процессе извлечения эталонных свай из грунта после их испытаний статическими нагрузками целесообразно фиксировать максимальное выдергивающее усилие, прикладывая к свае на начальном этапе ее извлечения ступенчато-возрастающие выдергивающие нагрузки с выдержкой их во времени по 15 минут. Это, как показано в дальнейшем, позволяет производить оценку предельного сопротивления грунта на боковой поверхности эталонных свай, а также прогнозировать несущую способность анкерных свай, используемых при испытаниях эталонных свай.

Рассмотрим, для чего и как используются данные, получаемые в результате испытаний эталонных свай динамическими нагрузками.

Во-первых, эти испытания подобны динамическому зондированию грунтов, и их результаты целесообразно рассматривать как дополнительный материал к

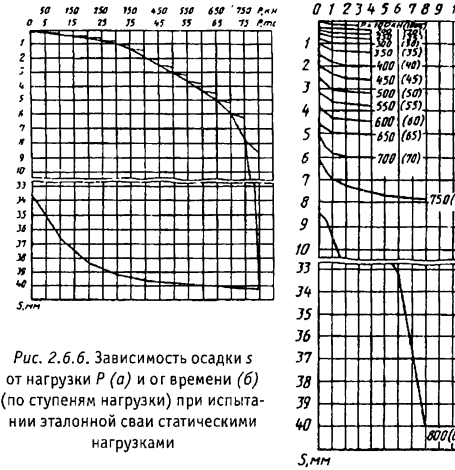


Рис. 2.6.6. Зависимость осадки *s* от нагрузки *P (а)* и от времени *(б)* (по ступеням нагрузки) при испытании эталонной сваи статическими нагрузками

данным зондирования, бурения и лабораторных исследований для оценки изменчивости свойств прорезаемых сваей грунтов в плане и по глубине.

Во-вторых, по результатам этих испытаний можно судить о наличии труднопробиваемых прослоек или линз грунтов, вызывающих затруднения при забивке натурных свай.

В-третьих, по получаемым при испытаниях показателям можно прогнозировать режим забивки натурных свай. При этом обычно задача стоит следующим образом: задан определенный молот для забивки натурной сваи с известной энергией удара, и по данным забивки эталонной сваи на глубину, соответствующую глубине погружения натурной сваи, необходимо определить режим погружения и, в частности, число ударов, требуемое для забивки натурной сваи. Вместе с тем может решаться и обратная задача – выбрать молот, обеспечивающий забивку натурной сваи в заданном режиме.

Можно рекомендовать следующую методику прогнозирования режима погружения натурной сваи. По формуле (1) для значений отказов эталонной сваи, полученных по измеренному числу ударов для определенных интервалов ее погружения (например 1 м), определяют значения ее предельного

сопротивления в процессе погружения. Исходя из этих значений, по формуле (2) находят значения предельного сопротивления натурной сваи для тех же интервалов погружения. Затем для этих значений определяют значения ее отказов по формуле, вытекающей из формулы:

$$S_a = \frac{\eta A E_d}{F_u (F_u + \eta A)} \times \frac{m_1 + \varepsilon^2 m_2}{m_1 + m_2}. \qquad (1)$$

Разделив высоты интервалов на полученные для них значения отказов натурной сваи, находят число ударов для ее погружения в каждом интервале, а, суммировав их по всей глубине погружения, — общее число ударов на погружение сваи до проектной глубины. Что касается общего числа ударов для натурной сваи (N), то его можно также приближенно определить исходя из общего числа ударов для эталонной сваи (N_s) и соответствующего ему среднего по глубине h отказа (h/N_s) по формуле:

$$N = \frac{F_{us}^a \frac{uh}{u_s} \left(F_{us}^a \frac{u}{u_s} + \eta A \right)}{\eta A E_d} \times \frac{m_1 + m_2}{m_1 + \varepsilon^2 m_2}; \qquad (2)$$

$$F_{us}^a = \frac{\eta_s A_s}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4 E_d^s N_s}{\eta_s A_s h} \times \frac{m_1^s + \varepsilon^2 m_2^s}{m_1^s + m_2^s}} - 1 \right],$$

где η и η_s — коэффициенты для натурной и эталонной свай, принимаемые в зависимости от их материала равными соответственно 1 500 и 5 000 кН/м^2; E_d и E_d^s — расчетная энергия удара молота для забивки натурной и эталонной свай; m_1 и m_1^s — масса молота для забивки натурной и эталонной свай; ε — коэффициент восстановления удара, принимаемый для натурной и эталонной свай равным $\sqrt{0,2}$; m_2 и m_2^s — масса натурной сваи и средняя масса при забивке эталонной сваи (так как она собирается из звеньев).

Следует отметить, что из формулы (2) можно, задаваясь числом ударов на забивку натурной сваи до проектной глубины, произвести оценку необходимой для этого энергии удара молота и выбрать его тип.

Интерпретация результатов испытаний эталонных свай статическими нагрузками, которые проводятся для прогнозирования несущей способности натурных свай, выполняется с учетом типа применяемой эталонной сваи.

Для эталонной сваи I типа, наиболее простой по конструкции, на основании обобщения, анализа и статистической обработки данных 70 параллельных испытаний эталонных и натурных свай длиной 5–11 м и сечением 30 × 30 и 25 × 25 см статическими нагрузками, проведенных ГПИ «Фундаментпроект» на различных площадках и в различных грунтовых условиях, была предложена следующая эмпирическая формула для расчета предельного сопротивления натурной сваи:

$$F_u = (u/u_s)F_{us}, \qquad (3)$$

где F_u — предельное сопротивление натурной сваи, соответствующее осадке Δ, определяемой согласно п. 5.5 СНиП 2.02.03-85; u и u_s — периметр натурной и эталонной сваи; F_{us} — предельное сопротивление эталонной сваи, принимаемое равным той нагрузке на графике «осадка — нагрузка», при которой осадка эталонной сваи равна осадке Δ.

Многочисленные сопоставления экспериментальных и полученных путем расчетов значений предельного сопротивления свай, проведенные рядом организаций, показали, что в большинстве случаев такой метод расчета даст удовлетворительные результаты. Это позволило включить его в ГОСТ 24942-81. Вместе с тем при заглублении нижних концов сваи в плотные песчаные и крупнообломочные грунты при использовании формулы (5, 3) наблюдалось занижение предельных сопротивлений свай. Учитывая это, в работе была обоснована целесообразность введения дополнительного коэффициента γ_s, зависящего от отношения предельных сопротивлений грунтов на боковой поверхности T_u^s и под нижним концом эталонной сваи Q_u^s и возрастающего по мере уменьшения этого отношения. В этом случае формула для расчета предельного сопротивления натурной сваи приобретает следующий вид:

$$F_u = \gamma_s \frac{u}{u_s} F_{us}. \qquad (4)$$

На основании анализа результатов 44 параллельных испытаний натурных и эталонных свай было показано, что при значениях отношения T_u^s/Q_u^s до 4–5 экспериментальные значения коэффициента γ_s, в большинстве случаев меньше расчетных, определяемых при условии независимости предельных удельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности свай от их поперечных размеров, но больше 1. Рекомендации по определению коэффициента γ, в формуле (4) в зависимости от отношения T_u^s/Q_u^s включены в ГОСТ 24942-81 для эталонных свай II типа, позволяющих осуществлять раздельное измерение сопротивлений T_u^s/Q_u^s

T_u^s/Q_u^s . . . . . $\leq 0{,}5$ 1 2 3 ≥ 4

γ_s 2,1 1,65 1,25 1,1 1

Как будет показано ниже, в настоящее время применительно к эталонным сваям II типа разработан более совершенный метод определения предельного сопротивления натурных свай. И вместе с тем можно рекомендовать формулу (4) и таблицу для более точного, чем по формуле (3), определения предельного сопротивления натурных свай по результатам испытаний эталонных свай I типа, используя для нахождения отношения T_u^s/Q_u^s данные их испытаний на выдергивание с учетом соотношений. Учитывая, что при заглублении нижнего конца эталонных свай в плотные пески или крупнообломочные грунты отношение T_u^s/Q_u^s практически всегда меньше 2, при подготовке СНиП 2.02.03-85 в формуле (5, 4) для этого случая коэффициент γ_s был принят равным 1,25.

В работе приведены результаты исследований, использованные для методики определения предельного сопротивления натурных свай по результатам испытаний эталонных свай III типа (ГОСТ 24942-81), основанной на прогнозировании графика зависимости осадки натурной сваи от нагрузки с использованием следующей формулы:

$$F^s = \gamma_{cR} R_s^s A + \gamma_{cf} f_{sp}^s h, \qquad (5)$$

где F^s — сопротивление натурной сваи при различных значениях осадок s, задаваемых при построении графика; γ_{cR} — коэффициент условий работы под нижним концом натурных свай, принимаемый в зависимости от предельного удельного сопротивления грунта под нижним концом эталонной сваи R_s, соответствующего нагрузке на сваю при осадке 20 мм:

R_s, МПа . . ≤ 4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
γ_{cR}	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

$R_s^{s'}$ — удельное сопротивление грунта под нижним концом эталонной сваи при осадке $s' = s(d_s/d)$ (где d_s — диаметр эталонной сваи, d — диаметр круглого или сторона квадратного либо меньшая сторона прямоугольного сечения натурной сваи); A – площадь поперечного сечения натурной сваи; γ_{cR} — коэффициент условной работы на боковой поверхности натурной сваи, определяемый по формуле: $\gamma_{cf} = \sum \gamma_{cf} h_i/h$; γ_{cf} — то же i-го слоя грунта на боковой поверхности сваи, принимается равным 0,6 для слоев глинистых грунтов тугопластичной, полутвердой и твердой консистенции, 0,8 для слоев глинистых грунтов мягкопластичной и тугопластичной консистенции и 1 для слоев

глинистых грунтов текучей консистенции и песков независимо от влажности, h_i — толщина i-го слоя грунта; h — глубина погружения натурной сваи; f_{sp}^{s} — среднее значение удельного сопротивления грунта на боковой поверхности эталонной сваи при осадке s, определяемое как частное от деления измеренного общего сопротивления грунта на боковой поверхности сваи при осадке s на площадь ее боковой поверхности в грунте.

Учитывая, что входящие в формулы (4) и (5) эмпирические коэффициенты получены на основании обобщения и анализа ограниченного количества экспериментальных данных, были проведены специальные исследования с целью дальнейшего совершенствования методов расчета несущей способности натурных свай по результатам испытаний эталонных свай II и III типов.

Следовало выявить влияние на предельные сопротивления грунта под нижним концом и на боковой поверхности эталонных и натурных свай различий в их материале, форме и размерах поперечного сечения, режиме погружения, а также различия в конструкции эталонных свай II и III типов. Кроме того, применительно к эталонным сваям III типа нужно было изучить влияние указанных факторов на мобилизацию сопротивления грунта под нижним концом и на боковой поверхности эталонных и натурных свай в допредельном состоянии, во всем диапазоне изменения нагрузок на сваи и их осадок в процессе испытаний.

Оценка влияния материала сваи сводится в рассматриваемом случае к сравнительной оценке сопротивления грунта на боковой поверхности и упругих деформаций сжатия металлических эталонных свай и железобетонных натурных свай. Экспериментальные данные показывают, что независимо от материала сваи при забивке вокруг нее образуется так называемая грунтовая рубашка, и при нагружении сваи наблюдается сдвиг грунта по грунту. Таким образом, значения сопротивления грунта на боковой поверхности эталонных и натурных свай можно принимать не зависящими от материала свай. Что касается упругих деформаций сжатия эталонных и натурных свай, то влияние на них материала следует учитывать совместно с площадью поперечного сечения свай нетто и передаваемыми на сваи нагрузками. Сравнение упругих деформаций эталонных свай, изготовленных из металлических труб диаметром 114 мм со стенкой толщиной 8 мм и наиболее часто применяемых в строительстве железобетонных свай сечением 30×30 см, показывает, что в одинаковых фазах деформирования основания свай разница между ними не превышает 30%, и ею можно пренебречь. Учитывая это, сопоставления графиков «осадка — нагрузка» для нижнего конца и боковой поверхности эталонных и натурных свай вполне допустимо проводить по осадкам, измеряемым на

уровне головы свай. Для свай квадратного сечения отличием его от круглого также пренебрегают.

Согласно существующим представлениям, характер работы оснований свай определяется их относительным заглублением h/d; при этом, начиная с некоторых критических значений $(h/d)_{cr}$, зависящих от вида и свойств грунта, характер работы оснований остается неизменным, и достижение предельного состояния сопровождается образованием локальных зон сдвига, расположенных ниже подошвы впай. Учитывая, что даже для плотных песков, забивка свай целиком в которые практически нецелесообразна $(h/d)_{cr}$, не превышает 20, характер работы оснований эталонных и натурных свай, погружаемых до одинаковой глубины, идентичен.

Следует отметить еще одно обстоятельство. После забивки свая, в принципе, может находиться в сжатом состоянии, когда за счет сил отрицательного трения, возникающих при упругой отдаче сваи после последнего удара молота, грукт под концом сваи остается сжатым нагрузкой, равной указанной силе отрицательного трения. Если такое явление имеет место, то очевидно, что для эталонной сваи среднее удельное сопротивление на конце, соответствующее остаточной нагрузке, выше, чем для натурной, и это следовало бы учесть при решении поставленной задачи. Однако измерение остаточных нагрузок после забивки свай затруднительно. Кроме того, по данным А. Весича, заметные остаточные нагрузки наблюдаются при погружении сваи лишь целиком в плотные песчаные и в прочные глинистые грунты, т. е. в случаях, редко встречающихся в строительной практике. Учитывая это, разницей в остаточном сжатии эталонных и натурных свай после забивки можно также пренебречь.

Как следует из экспериментальных данных и формулы (5), удельные сопротивления грунта под нижним концом эталонной и натурной свай при одних и тех же осадках и в предельном состоянии в общем случае отличаются друг от друга. Одной из причин этого является то обстоятельство, что ввиду различия в ширине (диаметре) эталонных и натурных свай вертикальные нагрузки, передающиеся на грунт через боковую поверхность (пригрузка от сил трения), и их равнодействующие приложены на разном расстоянии от оси свай. Исходя из современных представлений о физической сущности явлений, происходящих в грунте, окружающем конец сваи, при передаче на нее статических нагрузок можно влияние указанной нагрузки на удельное сопротивление грунта под нижним концом сваи R свести к следующему. Пригрузка препятствует возникновению растягивающих напряжений и трещин разрыва в грунте, расположенном выше подошвы сваи, и, следовательно, концентра-

ции сжимающих напряжений ниже подошвы. Пригрузка также препятствует перемещениям частиц грунта, расположенных ниже подошвы, в горизонтальном направлении. Эти действия пригрузки должны приводить к понижению R при переходе от сваи с меньшим диаметром (эталонной сваи) к свае большего диаметра (натурной). Вместе с тем пригрузка способствует перемещениям тех же частиц грунта в вертикальном направлении вниз, причем чем меньше диаметр сваи, тем ближе к оси воздействие пригрузки и тем большие напряжения и деформации от нее будут непосредственно под концом сваи; это должно приводить, наоборот, к повышению R при переходе от эталонной к натурной свае.

На основании вышеизложенного следует ожидать, что при расположении нижних концов свай в малосжимаемых грунтах удельное сопротивление R для эталонной сваи будет выше, чем для натурной, и, наоборот, в грунтах с относительно высокой сжимаемостью — ниже, чем для натурной. Аналогичные изменения удельного сопротивления R в таких грунтах должны происходить при переходе от испытания эталонной сваи III типа, когда нагрузка на грунт передается одновременно через нижний конец и боковую поверхность сваи, к испытанию наконечника эталонной сваи II типа в условиях отсутствия пригрузки от сил трения грунта по боковой поверхности сваи.

С целью экспериментальной проверки изложенных соображений, а также установления соотношений между значениями сопротивления для эталонных свай III и II типов были проведены две серии опытов в песчаных и пылеватоглинистых грунтах с использованием конструкций свай, позволяющих передавать нагрузку на грунт при испытаниях как одновременно через нижний конец и боковую поверхность, так и раздельно, путем последовательного нагружения указанных элементов сваи.

Первая серия опытов проводилась в НИИОСПе с металлической сваей сечением 10 × 12 см, погружаемой вдавливанием на глубину 2 м в среднезернистый маловлажный песок средней плотности (средняя плотность сухого грунта Q_d = 1,61 г/см^3 и рыхлого Q_d = 1,48 г/см^3). Результаты опытов (рис. 2.6.7) подтверждают, что влияние пригрузки от сил трения грунта по боковой поверхности сваи на удельное сопротивление грунта под ее нижним концом возрастает с увеличением сжимаемости песка.

Вторая серия опытов выполнялась на площадках Ленинграда НИИОСПом совместно с трестом «Ленинградоргстрой» с металлической инвентарной сваей, наружный диаметр которой соответствует диаметру эталонных свай (114 мм). Было проведено 35 опытов в пылеватых водонасыщенных песках, супесях, суглинках и глинах различной консистенции (от текучепластичной

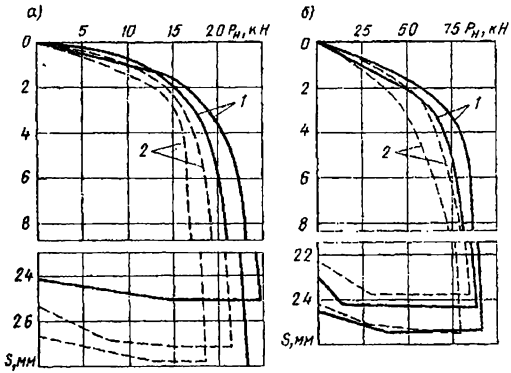


Рис. 2.6.7. Зависимости «осадка — нагрузка» на наконечник сваи в рыхлом (*а*) и плотном песке (*б*): 1 — при отдельном испытании; 2 — при общем испытании

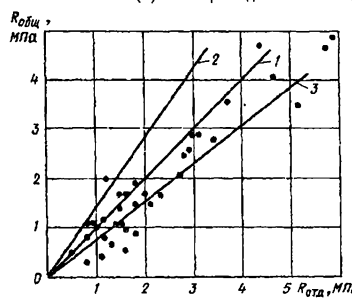


Рис. 2.6.8. Сопоставление значений предельных удельных сопротивлений грунтов под концом при $R_{общ}$ (общем) и $R_{отд}$ (отдельном) испытаниях наконечника сваи: 1 — линия абсолютной сходимости; 2, 3 — линии отклонения ±30%

до полутвердой). Сваи погружались вдавливанием на глубину 6–15 м с помощью специальной установки, разработанной трестом «Ленинградоргстрой». Сопоставляя полученные значения предельных удельных сопротивлений грунтов под нижним концом при общем испытании сваи $R_{общ}$ и отдельном испытании нижнего конца $R_{отд}$ (рис. 2.6.8), видим, что в подавляющем большинстве случаев сопротивление $R_{отд}$ превышает $R_{общ}$ и при этом в большей степени при $R_{отд} < 2$ МПа, т. е. при заглублении нижнего

конца сваи в сравнительно слабые грунты. Таким образом, результаты второй серии опытов также подтверждают изложенные выше соображения о влиянии пригрузки от сил трения по боковой поверхности сваи на удельное сопротивление под ее нижним концом R.

Кроме пригрузки, от сил трения по боковой поверхности сваи на удельное сопротивление R может влиять режим забивки свай, т. е. энергия и частота ударов при забивке. Вместе с тем специальные опыты, методика которых изложена далее, не показали заметного влияния режима забивки на указанное сопротивление R.

При проведении описанных ранее опытов влияния на среднее удельное сопротивление грунта по боковой поверхности эталонной и натурной свай нагрузок, передающихся на грунт через нижний конец сваи, не было обнаружено; это позволяет принимать сопротивление f не зависящим от типа эталонной сваи. В то же время было выявлено влияние на это сопротивление режима забивки свай.

При проведении исследований влияния режимов забивки свай на сопротивления грунта при их статическом нагружении в качестве критерия подобия режимов для эталонной и натурной свай, первая из которой, согласно ГОСТ 24942-81, забивается механическим молотом с энергией удара 6 кН·м, а вторая, как правило, — дизельными молотами, было принято общее число ударов на забивку, обычно используемое для характеристики энергоемкости оборудования [8]. В результате специальных опытов по забивке натурных свай дизельным молотом С-995 (наиболее часто используемым при погружении пробных свай) и эталонных свай – механическим молотом стандартной массой 400 кг при различной высоте его падения и соответственно энергии удара было выявлено, что режим погружения натурной сваи достаточно точно моделируется при энергии удара для забивки эталонной сваи 4 кН·м (рис. 2.6.9). Полученные данные свидетельствуют о том, что энергоемкость стандартного молота для забивки эталонных свай, как правило, превышает энергоемкость молотов для забивки натурных свай.

Специальные опыты по забивке эталонных свай молотом с разной энергией удара в пылевато-глинистые грунты тугопластичной консистенции показали, что энергия практически не влияет на сопротивление грунта под нижним концом сваи, а изменение энергии удара существенно сказывается на сопротивлении грунта на боковой поверхности сваи. На рисунке 2.6.10 показаны графики зависимости сопротивления грунта на боковой поверхности эталонной сваи II типа P от ее осадки при забивке сваи на глубину 12 м молотом с энергией удара 2,4 и 6 кН·м. Из графиков видно, что сопротивле-

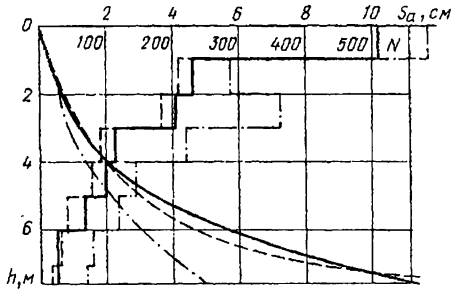


Рис. 2.6.9. Зависимость числа ударов и средних отказов от глубины погружения сваи в суглинках тугопластичных: – натурная свая; – – эталонная свая (энергия удара молота 4 кН·м); – · – · – то же (7.2 кН·м)

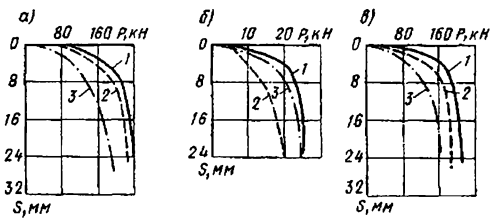


Рис. 2.6.10. Результаты испытаний эталонных свай, забитых с энергией удара молота: *а* — общих; *б* — наконечника свай; *в* — боковой поверхности свай; 1 — 2 кН·м; 2 — 4 кН·м; 3 — 6 кН·м

ние P уменьшается с увеличением энергии удара, и, следовательно, в таких грунтах удельное сопротивление f для натурных свай должно быть больше, чем для эталонных. В соответствии с упомянутыми выше результатами, полагая, что эквивалентом энергоемкости молота для забивки натурных свай является энергия удара молота 4 кН·м, получаем, что при значении среднего предельного удельного сопротивления грунта на боковой поверхности эта-

лонной сваи 37 кПа соответствующее значение среднего предельного удельного сопротивления грунта на боковой поверхности натурной сваи должно составить 42 кПа, т. е. на 10% больше. Уменьшение сопротивления f с увеличением энергии удара молота можно объяснить тем, что с ростом динамических нагрузок на связные грунты возрастает степень нарушения их структурных связей. Вместе с тем с увеличением структурной прочности связных грунтов этот фактор должен сказываться в меньшей степени.

Так, в суглинки преимущественно полутвердой консистенции были забиты одним и тем же молотом С-995 до глубины 6 м металлические сваи диаметром 73, 114, 219 и 325 мм. Естественно, что с увеличением диаметра свай требовалось большее число ударов на забивку, что эквивалентно уменьшению энергии ударов молота при постоянной площади поперечного сечения свай. Однако в таких грунтах значение среднего предельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи с возрастанием числа ударов не увеличивалось, а, наоборот, уменьшалось, составляя для свай диаметром 73, 114, 219 и 325 мм соответственно 100, 80 60 и 50 кПа. Это явление можно объяснить тем, что в пылевато-глинистых грунтах, устойчиво держащих вертикальные стенки скважины благодаря раскачке сваи при забивке, плотность примыкания грунта к ее боковой поверхности тем меньше и щель между грунтом и сваей в верхней ее части тем больше, чем большее число ударов молота сделано в процессе ее забивки.

Сопоставление числа ударов молота со значениями средних предельных удельных сопротивлений на боковой поверхности свай перечисленных диаметров, погруженных тем же молотом на глубину 6 м в среднезернистые пески средней плотности, показывает, что режим забивки свай в подобные песчаные грунты практически не влияет на значения указанных сопротивлений. Они составляют для свай диаметром 73, 114, 219 и 325 мм соответственно 103, 102, 97 и 113 кПа. Это, очевидно, обусловливается тем, что структурные связи песка, ввиду их незначительности, нарушаются практически независимо от величин динамических нагрузок, передающихся на грунт в процессе забивки сваи. Песок приобретает свойство текучести, заполняя щели между грунтом и сваей в верхней ее части, образующиеся от ее раскачки при забивке.

Обобщение, анализ и статистическая обработка результатов 35 параллельных испытаний эталонных свай III типа и свай диаметром 325 мм, выполненных в соответствии с требованиями ГОСТ 24942-81 и ГОСТ 5686-78 в различных районах страны, подтвердили сделанные выводы и позволили уточнить метод прогнозирования предельных сопротивлений и графика «осадка – нагрузка» натурных свай по результатам испытаний эталонных свай III типа.

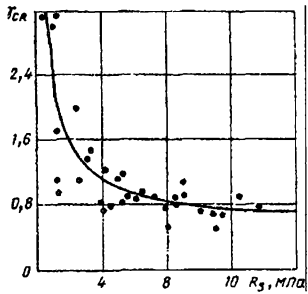


Рис. 2.6.11. Зависимость коэффициента условий работы γ_{cR} от предельного удельного сопротивления грунтов под нижним концом эталонной сваи R_S

В результате статистического анализа значений предельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности натурной и эталонной свай для коэффициентов $\gamma_{cR} = R/R_S$ и $\gamma_{cf} = f/f_{sp}$ были получены эмпирические уравнения регрессии гиперболического вида, достоверность которых оценивалась с помощью анализа дисперсии при 5%-ном уровне значимости.

Для коэффициента γ_{cR} по данным, приведенным на рисунке 2.6.11, получено следующее уравнение:

$$\gamma_{cR} = 0.59 + 1.86/R_s, \qquad (6)$$

при этом корреляционное отношение равно 0,78, среднеквадратическое отклонение индивидуальных значений γ_{cR} от линии регрессии в интервале изменения R_S от 2 до 14 МПа составляет 0,23, а при $R_S \leq 2$ МПа – 0,81.

Большое среднеквадратическое отклонение при залегании под нижним концом сваи слабых грунтов ($R_S \leq 2$ МПа), очевидно, связано, с одной стороны, с погрешностями измерительной аппаратуры при низких значениях R_S, и, с другой стороны, с тем обстоятельством, что согласно ГОСТ 5686-78*, ступени нагрузки при статических испытаниях назначаются равными 1/10 ожидаемой предельной, а это не позволяет достаточно точно оценить сопротивление грунта под нижним концом, если его доля в общем сопротивлении невелика (10–15%). Для коэффициента γ_{cf} по данным, приведенным на рисунке 2.6.12, получено следующее уравнение регрессии:

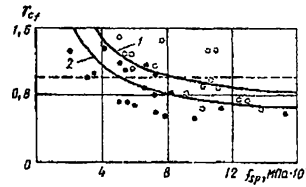


Рис. 2.6.12. Зависимость коэффициента условий работы γ_{cf} от предельного удельного сопротивления грунтов на боковой поверхности эталонной сваи

$$\gamma_{cf} = a + b/f_{sp}, \qquad (7)$$

где a и b — коэффициенты управления регрессии, зависящая от вида грунтов и составляющие соответственно для песчаных грунтов 0,61 и 0,031, а для пылевато-глинистых — 0,44 и 0,021.

Статические показатели при этом составляют соответственно для песчаных и глинистых грунтов: корреляционное отношение — 0,70 и 0,65, среднеквадратическое отклонение — 0,27 и 0,28.

Как видно из приведенных данных, на коэффициенты γ_{cR} и γ_{cf}, характеризующие отношения R/R_S и f/f_{sp}, существенно влияют грунтовые условия. Так, при залегании под нижним концом свай слабых грунтов (при $R_s \leq 3$ МПа) значения коэффициента $\gamma_{cR} > 1$, т. е. $R_s < R$, а в плотных и прочных грунтах (при $R_s > 10$ МПа) его значения меньше единицы, т. е. $R_s > R$. Как отмечено ранее, это можно объяснить влиянием пригрузки от сил трения на боковой поверхности на сопротивление грунтов под нижним концом сваи, которое неодинаково для натурной и эталонной свай. Аналогичная закономерность наблюдается и для коэффициента γ_{cf}. Вместе с тем для наиболее часто встречающихся грунтов в основании свайных фундаментов значения γ_{cR} и γ_{cf} близки к 1, т. е. $R_s \approx R$ и $f_{sp} \approx f$, чем, вероятно, и можно объяснить широко распространенное мнение о независимости предельных удельных сопротивлений грунтов от поперечного сечения сваи.

На соотношение между f и f_{sp}, существенно влияет тип грунтов, прорезаемых сваей. Как видно из рисунка 2.6.12, значения γ_{cf} для песчаных грунтов в среднем на 20% выше, чем для пылевато-глинистых, при одинаковых значениях f_{sp}.

Учитывая полученные результаты, предельное сопротивление натурной сваи следует рассчитывать по данным испытания статическими нагрузками эталонной сваи III типа по формуле:

$$F_u = \gamma_{cR} R_s A + \gamma_{cf} f_{sp} u h, \tag{8}$$

где γ_{cR} и γ_{cf} — коэффициенты условий работы, определяемые по рисункам 2.6.11 и 2.6.12 или таблице 2.5.2 (95%-ный доверительный интервал).

Если свая прорезает пылевато-глинистые и песчаные грунты, то при расчете принимается средневзвешенное значение коэффициента γ_{cf}, определяемое по формуле:

$$\gamma_{cf} = \frac{\gamma'_{cf} \sum h'_i + \gamma''_{cf} \sum h''_i}{h}, \tag{9}$$

где $\Sigma h'_i$ и $\Sigma h''_i$ — суммарные толщины слоев соответственно песчаных и пылевато-глинистых грунтов; γ'_{cf} и γ''_{cf} — коэффициенты условий работы соответственно для песчаных и пылевато-глинистых грунтов.

Анализ изменчивости в допредельном состоянии коэффициентом перехода от значений сопротивлений грунта под нижним концом и на боковой поверхности эталонной сваи к соответствующим значениям сопротивлений грунта для натурной сваи, проведенный на основе статистической обработки данных описанных ранее 35 параллельных испытаний, позволил уточнить и упростить методику прогнозирования графика зависимости «осадка — нагрузка» для натурных свай, регламентированную ГОСТ-24942-81.

Полученные γ^s_{cR} при осадках s натурной и эталонной свай, равных 1, 2, 5, 7, 15 и 25 мм, показывают, что зависимость значений коэффициента условий грунта на боковой поверхности сваи γ^s_{cf} от удельного сопротивления грунта, достигнутого при осадке s, практически можно описать уравнением (7) для предельных сопротивлений. Это связано с тем, что сдвиговые осадки, соответствующие достижению предельного состояния грунта на боковой поверхности сваи, составляют всего несколько миллиметров.

Что касается зависимости γ^s_{cR} от сопротивления грунтов под нижним концом сваи R^s_s, достигаемого при ее осадке s, то для всех осадок свай независимо от вида грунтов остается неизменной общая тенденция к уменьшению γ^s_{cR} с ростом R^s_s, выявленная для предельного состояния (рис. 2.6.13).

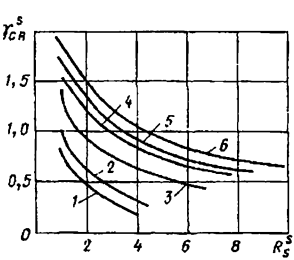


Рис. 2.6.13. Зависимость коэффициента условий работы γ^s_{cR} от удельного сопротивления грунтов под концом эталонной сваи R^s_s при осадке s, мм 1-1; 2-2; 3-5; 4-7; 5-15; 6-25 мм

С увеличением же осадки сваи при постоянном значении удельных сопротивлений R^s_s возрастает и коэффициент γ^s_{cR}. Это согласуется с выводами, сделанными в работе, относительно того, что в допредельном состоянии при равных удельных сопротивлениях R с увеличением диаметра свай возрастают соответствующие осадки.

Статистические параметры, характеризующие тесноту и силу связей полученных зависимостей γ^s_{cR} от R^s_s, составляют: корреляционное отношение 0,58–0,76, среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от эмпирических линий регрес-

сии при $R_s^s \geq$ 2 МП а – 0,21–0,3. При этом наибольший разброс значений γ_{cR}^s наблюдается при небольших осадках свай, что связано с погрешностями измерительной аппаратуры.

Прогнозирование графика «осадка — нагрузка» для натурной сваи следует осуществлять по получаемым при испытании эталонной сваи графикам зависимости осадок от удельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности сваи с использованием формулы:

$$F^s = \gamma_{cR}^s R_s^s A + \gamma_{cf} f_{sp}^s uh, \qquad (10)$$

где F^s — сопротивление натурной сваи при осадке s, задаваемой при построении графика; γ_{cR}^s — коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи, принимаемый по номограмме на рис. 2.6.13, в зависимости от значения R_s^s; R_s^s — удельное сопротивление грунтов под конном эталонной сваи при ее осадке s; A — площадь сечения натурной сваи; γ_{cf} — коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности (см. табл. 2.6.1); f_{sp}^s — удельное сопротивление на боковой поверхности эталонной сваи при ее осадке s; u, h — периметр и глубина погружения натурной сваи.

Приведем пример прогнозирования графика зависимости осадки натурной сваи от нагрузки по результатам испытания грунтов эталонной сваей III типа.

Пример. Требуется построить график зависимости осадки сваи от нагрузки (сечение сваи 30 × 30, глубина погружения 6 м).

Геологический разрез основания и график зависимости «осадка — нагрузка» по результатам статических испытаний эталонной сваи III типа (диаметр 114 мм, глубина погружения 6 м) приведены на рисунке 2.6.14. В табли-

Таблица 2.6.1

Под нижним концом сваи		На боковой поверхности сваи		
Предельное удельное сопротивление R_{sp}^s, МПа	Коэффициент γ_{cR}^c	Предельное удельное сопротивление f_{sp}^s, МПа	Коэффициент γ_{cf}	
			песчаные грунты	глинистые грунты
≤2	1,4	≤0,02	1,5	1,15
4	0,9	0,04	1,0	0,95
6	0,75	0,06	0,95	0,80
8	0,7	0,08	0,85	0,65
10	0,65	0,10	0,80	0,55
≥12	0,6	≥0,12	0,75	0,50

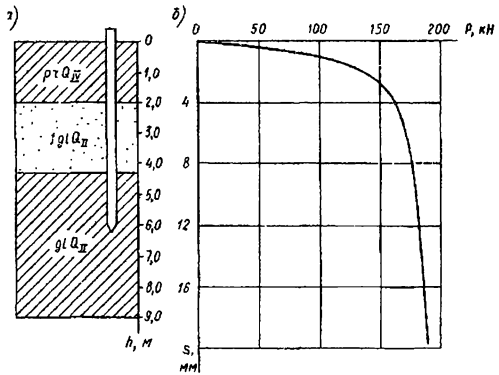


Рис. 2.6.14. Геологический разрез основания (*а*) и график зависимости осадки эталонной сваи от нагрузки (*б*)

це 2.6.2 показаны результаты расчета удельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности эталонной сваи; при этом сопротивления грунтов по боковой поверхности получены как разность нагрузки на эталонную сваю и измеренного сопротивления грунтов под нижним концом.

По данным таблицы 2.6.2 строим графики зависимости удельных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности эталонной сваи от осадки $R_s - s$ и $f_{sp} - s$ (рис. 2.6.14).

Затем зададимся осадкой s, для прогнозирования графика для натурной сваи, например: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20 мм. По формуле (10) вычислим значения сопротивлений грунтов оснований натурной сваи F^s при этих осадках. Например, зададимся осадкой s_i = 5 мм.

По графику «удельное сопротивление R_s — осадка s» найдем значение удельного сопротивления R_s^s при осадке 5 мм (рис. 2.6.15): R_s^s = 3,9 МПа. Затем по рис. 2.6.13 найдем значение коэффициента условий работы под нижним концом γ_{cR}^s при R_s^s = 3,9 МПа и осадке s = 5мм. Получим γ_{cR}^s = 0,67. Аналогично

Таблица 2.6.3

Нагрузка на эталонную сваю P	Осадка эталонной сваи s, мм	Под нижним концом		Под боковой поверхностью	
		сопротивление грунтов R, кН	удельное сопротивление грунтов, R_s, МПа	сопротивление грунтов f, кН	удельное сопротивление грунтов, f_{sp}, МПа
25	0,10	1,5	0,15	23,5	0,011
50	0,40	3,1	0,31	46,9	0,022
75	0,70	7,7	0,77	67,3	0,031
100	1,01	12,3	1,23	87,7	0,041
112,5	1,21	13,8	1,38	98,7	0,046
125	1,45	16,9	1,69	108,1	0,050
137,5	2,11	21,5	2,15	116,0	0,054
150,5	2,60	29,2	2,92	120,8	0,056
162,5	3,83	35,4	3,54	127,1	0,059
175,0	6,24	49,2	4,92	125,8	0,058
187,5	20,03	55,2	5,52	132,3	0,062

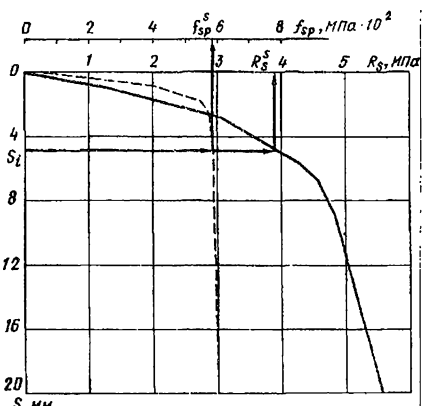


Рис. 2.6.15. График зависимости удельных сопротивлений грунта под нижним концом (сплошные линии) и на боковой поверхности (пунктирные) от осадки эталонной сваи

по графику $f_{sp} — s$ при осадке 5 мм (рис. 2.6.14) значение $f_{sp}^{s} = 0{,}058$ МПа и по таблице 2.6.1 найдем коэффициент γ_{cf}.

Так как вдоль боковой поверхности залегают и песчаные (толщина слоя 2,3 м), и глинистые грунты (3,7 м), вычислим средне-взвешенное значение коэффициента γ_{cf}:

$$\gamma_{cf} = \frac{0{,}66 \cdot 3{,}7 + 1{,}08 \cdot 2{,}3}{6{,}0} = 0{,}82.$$

По формуле (10) найдем значение P^s при осадке $s = 5$ мм. Площадь поперечного сечения сваи 30×30 равна 0,09, периметр — 1,2 м. При принятой глубине погружения 6 м вычислим:

$$F^s = 0{,}67 \cdot 3{,}9\ МПа\ 0{,}09 + 0{,}82\ 0{,}058\ МПа\ 1{,}2\ м\ 6 = 572{,}9\ кН.$$

Результаты расчета сопротивления грунтов основания натурной сваи при заданных осадках приведены в таблице 2.6.4, и по ним построен график «осадка — нагрузка» (рис. 2.6.15).

Таблица 2.6.3

Осадка, задаваемая при построении графика s, мм	Удельное сопротивление грунта под нижним концом эталонной сваи при осадке R_s^s, МПа	Удельное сопротивление по боковой поверхности эталонной сваи при осадке f_{sp}^s, МПа	Под нижним концом натурной сваи		По боковой поверхности натурной сваи		Расчетное сопротивление грунтов натурной сваи F^e, кН
			расчетное удельное сопротивление R_s, МПа	расчетное сопротивление грунтов Q, кН	расчетное удельное сопротивление f_{sp}, МПа	расчетное сопротивление грунтов T, кН	
1	1,2	0,040	0,54	48,6	0,041	295,2	343,8
2	2,1	0,054	1,34	120,9	0,046	332,4	453,3
3	3,2	0,057	1,79	161,2	0,048	344,7	505,9
5	3,9	0,058	2,53	228,1	0,048	344,7	572,8
7	4,6	0,059	3,63	327,0	0,049	352,9	679,8
10	4,8	0,059	3,79	341,3	0,049	352,8	694,1
15	5,2	0,059	4,1	369,7	0,049	352,8	722,5
20	5,5	0,062	4,51	405,9	0,052	367,2	773,1

С целью проверки предложенной методики прогнозирования зависимости «осадка — нагрузка» натурной сваи по данным испытаний грунтов эталонной сваей III типа для трех опытных площадок, сложенных песчаными грунтами средней плотности флювиогляциального генезиса (площадка № 1), глинистыми грунтами мягкотекучепластичной консистенции аллювиального генезиса (площадка № 2) и глинистыми грунтами тугопластичной полутвердой консистенции (площадка № 3), были рассчитаны графики зависимости «осадка — нагрузка» по предложенной методике и методике, регламентированной ГОСТ 24942-81.

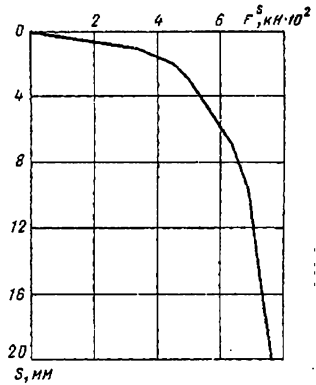


Рис. 2.6.16. Расчетный график «осадка — нагрузка» для натурной сваи

Сопоставление полученных зависимостей с результатами статических испытаний натурной сваи диаметром 325 мм (рис. 2.6.16) показывает, что предлагаемая методика более простая, чем методика, регламентируемая ГОСТ 24942-81, и позволяет улучшить сходимость графика с фактически получаемым по данным статических испытаний; при этом расхождение абсолютных величин прогнозируемых сопротивлений не превышает +15%.

Для оценки достоверности определения несущей способности натурной сваи, по данным испытания грунтов забивной эталонной сваей III типа, по результатам 37 параллельных испытаний натурных и эталонных свай, описание которых приведено выше, проведен расчет значений предельного сопротивления сваи по предлагаемому методу с использованием формулы (8) и по методике, регламентируемой ГОСТ 24942-81.

Сопоставление результатов расчета с полученными при статических испытаниях свай (рис. 2.6.17) показывает, что предлагаемый метод позволяет повысить достоверность определения несущей способности сваи. Статистические параметры разработанного метода и метода, регламентированного ГОСТ 24942-81, приведены в таблице 2.6.5.

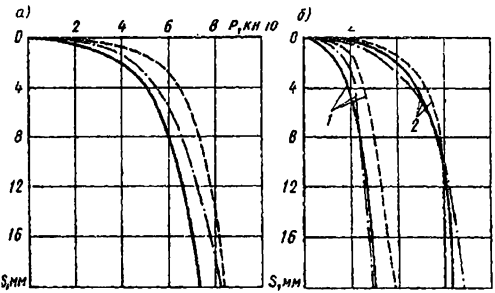


Рис. 2.6.17. Сопоставление графиков зависимости «осадка — нагрузка» для натурной сваи, погруженной в пески средней плотности (*а*) и в суглинки (*б*) текучепластичной (1) и тугопластичной консистенции (2): статические испытания натурной сваи - - - — испытания грунтов эталонной сваей и по предлагаемой методике; – – – –то же и по методике, изложенной ГОСТ 24942-81

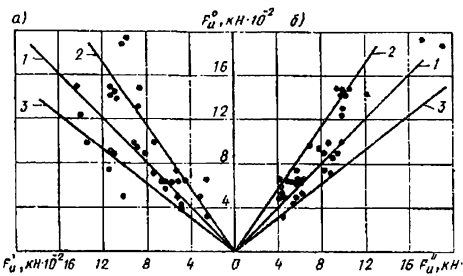


Рис. 2.6.18. Сопоставление значений предельного сопротивления натурной сваи по результатам статических испытаний F_u с расчетными по данным испытания грунтов эталонной сваей III типа по ГОСТ 24942-81 (*а*) и по предлагаемому методу (*б*): 1 — линия абсолютной сходимости; 2, 3 — линия отклонения ±30

Таблица 2.6.4

Параметры	Значение параметров	
	по формуле (5.8)	по ГОСТ 24942-81
Отношение Fu/F0u	0,89	0,84
Среднеквадратическое отклонение	0,22	0,29
Отклонение >30% в сторону занижения, %	15	27
Отклонение >30% в сторону завышения, %	3	12
Среднее отклонение в сторону занижения	0,20	0,28
Среднее отклонение в сторону завышения	0,17	0,21

Результаты описанных исследований влияния на предельные сопротивления грунтов под нижним концом и на боковой поверхности эталонных свай их конструкции (для свай II и III типов) позволили уточнить метод расчета предельного сопротивления натурных свай по результатам испытаний эталонных свай II типа.

Для них предельное сопротивление следует определять по формуле (8) для эталонных свай III типа, в которой коэффициент γ_{cR} принимается в зависимости от R_s:

R_s МПа . . . ≤ 2 4 6 8 10 12

γ_{cR} . . . . . 1,15 0,85 0,7 0,65 0,6 0,55.

Для проверки методики определения несущей способности натурной сваи, по данным исследований грунтов оснований эталонной сваей II типа, проведен расчет значений предельного сопротивления свай по результатам параллельных испытаний железобетонных натурных свай сечением 30 × 30 см и испытаний грунтов эталонной сваей II типа, выполненных трестом «СевкавТИСИЗ». Приведенное на рисунке 2.6.18 сопоставление рассчитанных значений по предлагаемому методу (рис. 2.6.19,б) и по методике, регламентированной ГОСТ 24942-81 (рис. 2.6.19,а), с результатами испытаний статическими нагрузками показывает, что предлагаемая методика позволяет значительно повысить расчетные нагрузки на сваю.

Определенный интерес представляет также сопоставление с другими методами определения несущей способности сваи. По данным 57 параллельных испытаний грунтов эталонной сваей и статического зондирования, установкой С-979, выполненных также трестом «СевкавТИСИЗ», произведен расчет

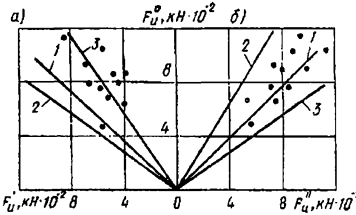


Рис. 2.6.19. Сопоставление значений предельного сопротивления натурной сваи, по данным статических испытаний F_u^o с расчетными по испытаниям эталонной сваи II типа

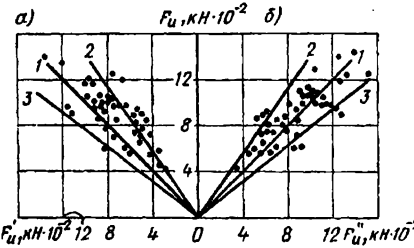


Рис. 2.6.20. Сопоставление расчетных значений предельного сопротивления сваи сечением 30×30 см по данным статического зондирования *К* (*а*) и по данным испытания грунтов эталонной сваей II типа (*б*)

несущей способности сваи сечением 30 × 30 см по сравниваемым методам и по данным статического зондирования в соответствии со СНиП 2.02.03-85. Как видно из результатов расчета, приведенных на рисунке 2.6.19, предлагаемый метод (рис. 2.6.19, *б*) позволяет на 15–20% улучшить точность определения несущей способности натурной сваи по сравнению с рекомендуемой в ГОСТ 24942-81 методикой (рис. 2.6.19, *а*).

Наряду с эталонными сваями, погружаемыми забивкой, в последние годы некоторые организации для прогнозирования несущей способности натурных свай стали использовать металлические сваи тех же размеров и аналогичной конструкции, что и эталонные сваи, но погружаемые вдавливанием. Для слабых грунтов, вдавливание свай в которые не вызывает больших затруднений, использование такого способа имеет ряд преимуществ перед забивкой: во-первых, погружение, испытание грунтов и последующее извлечение сваи осуществляется одной и той же установкой, что значительно сокращает трудоемкость и продолжительность проведения испытаний; во-вторых, вдавливание сваи вызывает значительно меньшие нарушения структуры окружающего грунта, что позволяет сокращать продолжительность «отдыха» грунтов перед их испытаниями статическими нагрузками.

Для погружения таких свай в грунт трестом «Ленинградоргстрой» разработана и используется специальная установка, развивающая усилие до 400 кН и позволяющая проводить испытания статическими нагрузками эталонных свай любого типа.

При использовании результатов испытаний грунтов вдавливаемыми сваями малого сечения для определения несущей способности забивных свай необходимо учитывать влияние способа погружения на получаемые значения сопротивлений грунтов. Однако опубликованные по этому вопросу сведения противоречивы. Так, например, по данным исследований Б. В. Гончарова и Ю. В. Трояновского, проведенных со сваями сечением 30 × 30 и 25 × 25 см в глинистых грунтах, несущая способность вдавливаемых свай в среднем на 15% ниже несущей способности забивных. В работе [21] отмечается, что в слабых глинистых грунтах даже после «отдыха» сваи в течение 4–6 месяцев несущая способность свай на 10% превышает несущую способность забивных. Существует мнение, что способ погружения не влияет на несущую способность сваи вообще.

Для обоснования и разработки метода прогнозирования несущей способности натурных свай по результатам испытаний эталонных свай, погружаемых вдавливанием, были проведены специальные исследования влияния способа погружения свай на сопротивления грунта под их нижним концом и на

боковой поверхности. Исследования проводились в лотке с моделями свай в песчаном грунте и в полевых условиях в пылевато-глинистых и песчаных грунтах со сваями диаметром 114 мм.

Исследования в лотке включали изучение траекторий перемещения частиц грунта методом фотофиксации, по В. А. Курдюмову, в процессе погружения моделей вдавливанием и забивкой и испытания моделей свай статическими нагрузками. Исследования были проведены в маловлажном (влажность 5–6%) мелкозернистом песке, который укладывался послойно в лоток и уплотнялся ручной трамбовкой до плотности 1,49–1,52 (рыхлое сложение) и 1,59–1,62 г/см^3 (средней плотности), диаметром 36 мм, с коническим наконечником и углом при вершине 60°. При исследованиях методом фотофиксации цилиндры разрезались вдоль продольной оси. Фотографирование проводилось студийной фотокамерой на репродукционно-штриховые технические фотопластинки размером 18×24 см. Вдавливание моделей осуществлялось гидравлическим домкратом со скоростью 0,05–0,1 м/мин, забивка — грузом массой 10 кг, свободно падающим с различной высоты (15; 35 и 40 см) для изменения режима погружения. Относительное заглубление моделей h/d составляло 18–21 см (рис. 2.6.20).

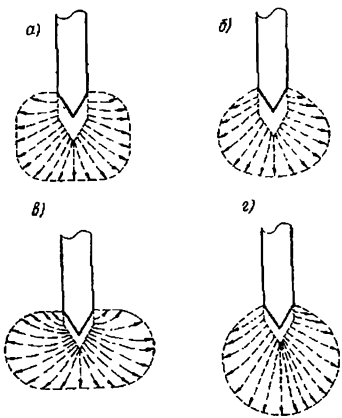


Рис. 2.6.21. Схема траекторий перемещения частиц грунта: *а, в* — при забивке модели сваи в песок соответственно рыхлого сложения и средней плотности; *б, г* — при вдавливании модели сваи в песок соответственно рыхлого сложения и средней плотности

Как видно из рисунка 2.6.20, перемещение частиц грунта при относительном заглублении моделей h/d около 20 см происходит за счет внутреннего выпора и уплотнения грунта под нижним концом, что подтверждает результаты многочисленных экспериментальных исследований характера деформаций, возникающих в грунте при

вдавливании стержневых зондов и зависящих от взаимодействия зон сдвигов и сжатия.

В рыхлом песке способ погружения свай практически не влияет на характер развития деформаций основания (см. рис. 2.6.20, *а, б*). Так, относительная высота уплотненной зоны под нижним концом для вдавливаемых моделей составляет (3,4–3,6) *d*, а для забитых — (3,1–3,7) *d*; ширина зоны составляет соответственно (3,8–4,1) *d* для вдавливаемых и (3,5–4,1) *d* — для забитых моделей. В песках средней плотности при вдавливании сваи песчаные частицы движутся в основном вниз и в меньшей степени в сторону от направления движения (см. рис. 2.6.20, *а, б*). При забивке преобладает движение частиц в горизонтальном направлении; при этом глубина уплотненной зоны (см. рис. 2.6.20, *в, г*) под нижним концом вдавливаемых моделей равна (3,2–3,6) *d*, а забиваемых — (1,9–3,0) *d*.

Таким образом, для оснований, сложенных плотными грунтами, способ погружения сваи влияет на размеры и форму уплотненной зоны под ее нижним концом и, следовательно, на сопротивление грунтов при приложении к свае статических нагрузок.

Для количественной оценки влияния способа погружения на значения сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности свай проведены параллельные испытания статическими вдавливающими нагрузками эталонных свай диаметром 114 мм, погруженных на глубину 6 м вдавливанием и забивкой. Исследования были выполнены на трех опытных площадках Санкт-Петербурга, сложенных до глубины 10–12 м супесями пластичными (площадка № 1), пылеватыми водонасыщенными песками (площадка № 2) и тугопластичными суглинками (площадка № 3).

Конструкция эталонной сваи позволяла проводить испытания грунтов отдельно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, а также выделять сопротивление грунта под нижним концом при испытании сваи в целом. Вдавливание сваи осуществлялось рассмотренной ранее установкой, а забивка – молотом массой 350 кг, свободно падающим с высоты 1,2–2,5 м, с использованием буровой установки УГБ-50.

Испытания вдавленных и забитых свай статическими вдавливающими нагрузками были проведены в соответствии с ГОСТ 24942—81 после их отдыха в течение 8 суток. Кроме того, для оценки влияния продолжительности «отдыха» на сопротивление грунтов два опыта в тугопластичных суглинках проведены после отдыха в течение 60 суток.

По результатам статических испытаний средние удельные значения предельного сопротивления грунта под наконечником сваи, погруженной вдав-

ливанием, МПа, равны: для супесей пластичных — 0,95, тугопластичных суглинков – 3,2 и пылеватых песков — 4,9, а для погруженных забивкой равны соответственно: 0,9; 2,1 и 4,3. Средние удельные значения предельного сопротивления грунтов на боковой поверхности сваи, погруженной вдавливанием, МПа, равны: для супесей — 0,025, песков пылеватых — 0,030 и суглинков тугопластичных — 0,039, а для погруженных забивкой равны соответственно: 0,010; 0,010 и 0,020. Таким образом, сопротивление грунта под нижним концом забитой эталонной сваи составляет 70–90% сопротивления вдавленной сваи; сопротивление грунта на боковой поверхности сваи, погруженной забивкой, составляет 33–50% сопротивления вдавленной.

Влияние способа погружения — вдавливания или забивки — практически не сказывается на сопротивлении грунтов под нижним концом в относительно слабых грунтах – супесях пластичных. В прочных грунтах сваи, погруженные вдавливанием, имеют значительно более высокие сопротивления грунтов под нижним концом, чем погруженные забивкой, что согласуется с результатами рассмотренных ранее исследований на моделях.

Более значительно способ погружения влияет на сопротивление грунтов на боковой поверхности сваи. Это отличие особенно велико в слабых грунтах — супесях пластичных (общее сопротивление составляло 21 и 52 кг соответственно для забитой и вдавленной свай) и несколько меньше для оснований, сложенных прочными грунтами (суглинки тугопластичной — полутвердой консистенции), — 43 и 84 кН. Влияние способа погружения, по-видимому, происходит как в связи с различной степенью нарушения структуры грунта вокруг боковой поверхности свай, которое более значительно в случае погружения свай забивкой, так и в связи с формированием уплотненной зоны разной ширины вдоль боковой поверхности свай, на что было указано ранее.

На площадке № 3, сложенной суглинками тугопластичной — полутвердой консистенции, кроме испытаний грунтов эталонной сваей после 8-суточного «отдыха» были проведены также испытания грунтов эталонными сваями, погруженными забивкой и вдавливанием после их «отдыха» в течение 60 суток. С увеличением времени «отдыха» грунтов с 8 до 60 суток предельное сопротивление под нижним концом сваи практически не изменяется, сопротивление грунтов на боковой поверхности возрастает соответственно с 84 до 153 кН для вдавленных и с 43 до 112 кН для забивных моделей свай. При этом с увеличением «отдыха» грунтов уменьшается влияние способа погружения сваи. Если после 8-суточного отдыха сопротивление грунтов для забитых свай не превышало 50% соответствующего сопротивления для вдавленных

свай, то после «отдыха» в течение 60 суток оно достигало 70% сопротивления вдавленных свай. Таким образом, влияние способа погружения обусловлено разной степенью нарушения структуры грунтов вдоль боковой поверхности, которое будет уменьшаться по мере «восстановления» структуры грунтов, частично связано с формированием различных зон уплотнения вокруг сваи, которое практически не зависит от продолжительности отдыха.

На основе проведенных исследований переход от значений сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности вдавленной эталонной сваи к соответствующим значениям сопротивлений для забивных свай может осуществляться путем их умножения на коэффициенты условий работы грунта под нижним концом γ'_{cR} и на боковой поверхности γ'_{cf}, количественные значения которых в зависимости от грунтовых условий даны в таблице 2.6.6.

Таблица 2.6.5

Грунтовые условия	Коэффициент условий работы грунта	
	под нижним концом	на боковой поверхности
Супесь пластичная, глинистые грунты мягко-текучепластичной консистенции, песок пылеватый водонасыщенный	1,0	0,4
Глинистые грунты тугопластичной и полутвердой консистенции	0,8	0,5

Таким образом, применительно к эталонным сваям II и III типов, погружаемым вдавливанием, прогнозирование несущей способности натурных свай, погружаемых забивкой, можно рассчитать с использованием формул (8) и (10). Однако значения входящих в них коэффициентов условий работы γ_{cR} и γ_{cf} следует корректировать путем умножения приведенных в таблице 2.6.1 значений на коэффициенты, приведенные в таблице 2.6.5.

Получаемые в процессе погружения эталонных свай значения усилия вдавливания целесообразно использовать в дополнение к данным бурения и зондирования для оценки однородности грунтов, а также для ориентировочной оценки предельного сопротивления эталонной сваи вдавливающим нагрузкам для назначения величин ступеней нагрузок при последующих статических испытаниях свай.

Сопоставление значений усилия вдавливания в интервале глубин погружения до 5,5–6,0 м со значениями предельного сопротивления эталонных

свай, полученными по их испытаниям статическими нагрузками, показывает, что их связь хорошо описывается линейным соотношением вида:

$$F = \chi F_u, \tag{11}$$

где F — усилие вдавливания сваи; χ — коэффициент пропорциональности, равный для песков пылеватых 0,75; супесей — 0,80 и суглинков тугопластичной консистенции — 0,85; F_u — предельное сопротивление сваи при статических испытаниях.

Следует отметить, что полученное для суглинков тугопластичной консистенции значение коэффициента χ хорошо согласуется со значением, полученным Э. А. Товмасяном при вдавливании сваи длиной 4 м и сечением 20 × 20 см в пылевато-глинистые грунты тугопластичной и полутвердой консистенции.

Взамен эталонных свай в некоторых случаях применяют сваи-зонды, которые по своим наружным размерам, способу погружения и методике испытания соответствуют эталонным сваям II типа, а по способу измерения сопротивлений грунтов основания — зонду II типа, позволяя фиксировать сопротивления грунтов под нижним концом и на участке боковой поверхности сваи (муфте трения), примыкающем к концу [7].Свая-зонд диаметром 127 мм показана на рисунке 2.6.21. В ее состав входят соосно расположенные подвижные наконечник 1 и муфта 2 рабочей площадью 0,25 м^2, соединенные с гидроцилиндром 3 в нижней части полости сваи, а также ствол из отдельных звеньев длиной 1,5–3 м. Управление гидроцилиндром осуществляется с помощью маслопровода путем нагнетания жидкости ручным насосом 4, расположенным на поверхности. Перемещения наконечника и муфты измеряются прогибомером 5. Для контроля фиксированного положения сваи в процессе испытания применяется репер с прогибомером 6.

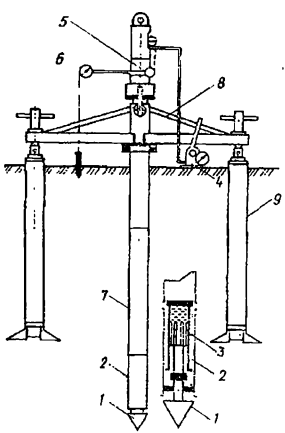


Рис. 2.6.22. Свая-зонд

Реактивные усилия, возникающие при нагружении наконечника муфты,

воспринимаются стволом сваи 7 и передаются на анкерное устройство, состоящее из упорной балки 8 и анкеров 9. В качестве анкеров могут быть применены винтовые сваи, шпеки, сваи с раскрывающимся наконечником.

Испытания сваи-зонда статическими нагрузками проводят по методике, аналогичной методике, применяемой при испытаниях эталонных свай II типа и позволяющей определить предельные удельные сопротивления грунтов под нижним концом R_{ps} и на участке боковой поверхности f_{ps} сваи-зонда.

Идентичность процессов взаимодействия с грунтом наконечников сваи-зонда и эталонной сваи II типа, с одной стороны, и установленные в работе соотношения между удельными сопротивлениями грунтов на муфтах трения сваи-зонда и зонда II типа при статическом зондировании, с другой стороны, позволяют предложить метод расчета предельного сопротивления натурной сваи по данным определения предельных сопротивлений R_{ps} и f_{ps} при испытании сваи-зонда.

Учитывая сказанное, применительно к свае-зонду предельное сопротивление натурной сваи можно определять по формуле (8), в которой коэффициент условий работы γ_{cR} принимается в зависимости от $R_{ps} = R_s$, как для эталонной сваи II типа.

Что касается коэффициента условий работы γ_{cf}, то его значения можно получить путем сопоставления приведенной в зависимости отношения K_f удельных сопротивлений грунта на муфте трения сваи-зонда f_{ps} и зонда II типа f_s от сопротивления f.

Определяя для задаваемых на кривой 1 точек сопротивления $f_{ps} = K_f f_s$, при тех же f_s находим по кривой 4 соответствующие сопротивления f и отношения f/f_{ps}, представляющие собой значения коэффициента условий работы γ_{cf} в зависимости от f_{ps}.

f_{ps} МПа . .	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
γ_{cf}	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7

При применении свай-зондов, погружаемых в грунт не забивкой, а вдавливанием, в расчетную формулу для определения предельного сопротивления натурных забивных свай, так же, как и для

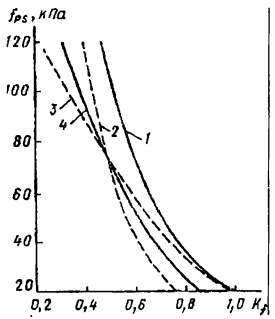


Рис. 2.6.23. Зависимости коэффициента перехода от удельного сопротивления на муфте трения

эталонных вдавливаемых свай, должны вводиться коэффициенты условий работы грунта под нижним концом и на боковой поверхности, значения которых можно определять по таблице 2.6.5. Следует отметить, что опыт применения свай-зондов при исследованиях грунтов значительно меньший, чем эталонных свай. Кроме того, при выполнении работ, в общем случае локальное измерение сопротивления грунта на участке боковой поверхности зонда или сваи малого сечения, примыкающем к их концу, приводит к бо́льшим погрешностям при прогнозировании общего сопротивления грунта на боковой поверхности натурной сваи, чем измерение общего сопротивления грунта на боковой поверхности зонда или сваи малого сечения. Учитывая это, сваи-зонды целесообразно применять при необходимости исследований грунтов на глубинах свыше 12 м, когда использование эталонных свай стандартного поперечного сечения 100 см^2 не предусматривается ГОСТ 24942-81, а также в тех случаях, когда заранее известно, что при эксплуатации строящихся зданий или сооружений свойства грунтов, прорезаемых сваями, сильно изменятся (например, просадочных грунтов).

Несущая способность натурных свай при применении эталонных свай и свай-зондов определяется по формуле:

$$F_d = \left(\gamma_c \sum F_u\right) / n\gamma_q, \qquad (12)$$

где γ_f — коэффициент условий работы, принимаемый равным 1; n — число испытаний эталонных свай или свай-зондов; F_u — частное значение предельного сопротивления сваи в месте испытания эталонной сваи или сваи-зонда, определяемое рассмотренными методами; γ_q — коэффициент надежности по грунту, устанавливаемый в зависимости от изменчивости полученных частных значений предельного сопротивления сваи F_u в местах испытаний эталонных свай или свай-зондов при значении доверительной вероятности a = 0,95 в соответствии с требованиями ГОСТ 20522-75.

При этом при применении эталонных свай III типа, позволяющих прогнозировать график «осадка — нагрузка» для натурных свай, предельное сопротивление натурной сваи определяется по графику, так же, как по результатам испытаний натурных свай статическими нагрузками.

2.6.2. Испытания грунтов опытными буронабивными сваями малого сечения

При исследованиях грунтов для проектирования свайных фундаментов испытания грунтов буронабивными сваями малого сечения (в дальнейшем будем называть испытаниями свай малого диаметра) проводят применительно

к висячим сваям цилиндрической формы для прогнозирования их несущей способности. Опытная свая малого диаметра (рис. 2.6.23) представляет собой цилиндрическую буронабивную сваю длиной до 20 м, диаметр которой назначают минимально возможным, обеспечивающим прочность и устойчивость ее ствола по материалу от действия ожидаемых предельных нагрузок. Рекомендуются следующие соотношения:

длина l, м, не более	*6 12 18 24;*
ожидаемая предельная нагрузка P_u, МН	*4 6 9 12;*
диаметр d, м	*0,20 0,25 0,30 0,35.*

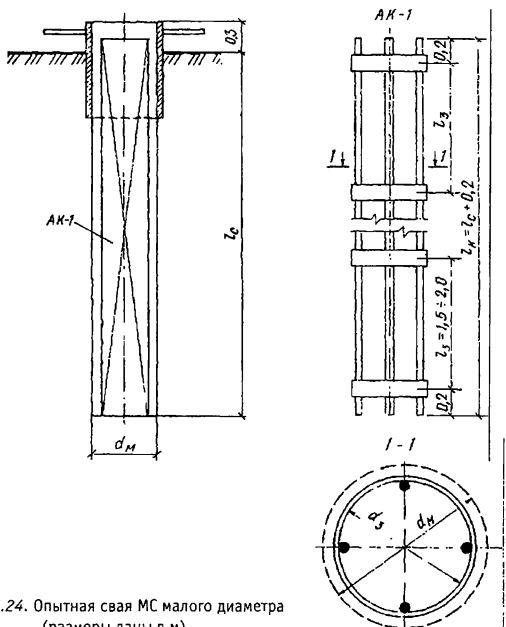


Рис. 2.6.24. Опытная свая МС малого диаметра (размеры даны в м)

В конструктивном отношении различают сваи малого диаметра обычные, при изготовлении которых заполняется бетоном весь объем скважины, и с воздушной полостью в нижней части. Проходку скважин при изготовлении сваи малого диаметра необходимо выполнять по технологии, предусмотренной проектом для натурных свай. Зачистка забоя обязательна. При проведении буровых работ должны быть приняты меры против попадания в скважины влаги. Глубина скважины для сваи с воздушной полостью назначается больше, чем для обычной, не менее чем на 1 м.

Сваи армируют на всю длину объемными каркасами, состоящими не более чем из четырех продольных стержней. Диаметр арматурных стержней определяется расчетом, однако принимается не менее 18 А–II. В качестве поперечной арматуры для повышения жесткости рекомендуется использовать обрезки тонкостенных труб длиной 5–8 см, располагаемые с шагом 1,5–2,0 м по длине каркаса. При изготовлении каркаса для сваи с воздушной полостью к его нижнему торцу приваривают поддон, представляющий собой круг диаметром на 1–2 см меньше диаметра скважины, вырезанный из листовой стали толщиной 6–8 мм. Такой каркас помещают в скважину и затем надежно закрепляют на поверхности грунта.

Бетонирование скважин выполняют методом прямого сброса через направляющую воронку бетонной смеси, характеризуемой осадкой стандартного конуса ОК–14 см. Фракция заполнителя — 10–20 мм. Подачу бетона производят методом ВПТ или вручную, мелкими порциями из мерной тары с обязательным измерением объема уложенной смеси. Визуальный контроль равномерности подъема уровня бетонной смеси в скважине производят постоянно. В случае зависания бетона его устраняют потряхиванием каркаса. С глубины от поверхности грунта 1,5–2,0 м укладку бетонной смеси производят с помощью вибратора. Оголовок сваи заключают в металлическую обойму длиной 0,7–1,0 м.

Эффективность применения опытных свай малого диаметра, по сравнению с пробными сваями натурного размера, обусловливается следующими факторами:

1) устройство опытных свай не требует создания материально-технической базы на месте будущей строительной площадки, что позволяет проводить испытания опытных свай на стадии проектирования;
2) проходка скважин для свай малого диаметра может осуществляться буровыми станками небольшой мощности, имеющимися у изыскательских организаций;
3) при испытаниях свай малого диаметра не требуется больших нагружающих усилий, что значительно упрощает конструкцию системы, воспри-

нимающей реактивные усилия домкрата, а в качестве анкерных свай позволяет использовать инвентарные сваи (забивные, винтовые и т. п.);

4) сокращается продолжительность испытаний;
5) методика обработки результатов испытаний позволяет при проектировании варьировать поперечные размеры проектируемой буронабивной сваи, определяя наиболее рациональное сечение конкретного фундамента;
6) малая стоимость и трудоемкость устройства опытных свай малого диаметра при производстве изысканий позволяет увеличить число испытуемых свай, что ведет к повышению достоверности опытных данных и, следовательно, увеличивает надежность проектного решения.

«Для разработки методики прогнозирования несущей способности натурных буронабивных свай по результатам испытаний свай малого диаметра институтом НИИОСП совместно с ГПИ «Фундаментпроект» на трех опытных площадках (в г. Набережные Челны, Тирасполе и Никополе) были проведены экспериментальные исследования, включавшие изготовление и испытания статическими нагрузками буронабивных свай разного диаметра (от 0,2 до 0,8 м), конструкции и технология изготовления которых соответствовали рассмотренным ранее. При этом на каждой опытной площадке длина свай, м, разного диаметра была одинаковой и составляла: в Набережных Челнах — 16, в Тирасполе — 13, и в Никополе — 8.

Эти площадки до отметок нижних концов свай сложены суглинками различной консистенции, а ниже — мелкими песками средней плотности (для свай длиной 16 м), гравийным грунтом с песчаным заполнителем (13 м) суглинками мягкопластичной консистенции (8 м).

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы. Параллельные испытания в идентичных грунтовых условиях опытной сваи малого диаметра с опиранием на забой и сваи того же диаметра и длины бетонной части с воздушной полостью позволяют осуществить «прогнозирование графика «осадка — нагрузка» для натурной сваи во всем диапазоне изменения нагрузки вплоть до предельной; при этом необходимо учитывать разницу в деформациях ствола сваи малого диаметра и натурной сваи. Вместо испытания сваи с воздушной полостью можно провести испытание сваи малого диаметра обычной конструкции на выдергивание, хотя следует отдать предпочтение первому испытанию как более точному.

Предельные удельные сопротивления грунта на боковой поверхности и под нижним концом сваи малого диаметра и натурной сваи, имеющих конструктивное и технологическое подобие, могут быть приняты не зависящими от

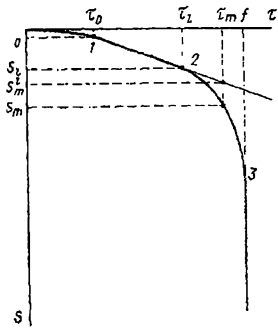


Рис. 2.6.25. Зависимость сопротивление грунта на боковой поверхности сваи от осадки

их диаметра. При оценке предельного сопротивления грунта на боковой поверхности обычной сваи по предельному сопротивлению, получаемому при испытании сваи того же диаметра и той же длины с воздушной полостью под нижним концом, следует вводить понижающий коэффициент 0,9, а при испытаниях сваи на выдергивание – повышающий коэффициент 1,15.

Испытания свай малого диаметра статическими нагрузками проводят после набора бетоном проектной прочности, но не ранее чем через 28 суток. Величины ступеней нагрузок и критерии стабилизации перемещений принимаются в соответствии с ГОСТ 24942-81 в зависимости от состава, свойств и состояния прорезаемых грунтов и грунтов под нижним концом свай.

График зависимости сопротивления грунта на боковой поверхности сваи от осадки (рис. 2.6.24) представляется состоящим из трех участков, соответствующих следующим этапам работы сваи под нагрузкой:

0–1 — мобилизация сопротивления грунта на боковой поверхности сваи при неподвижном нижнем конце;

1–2 — линейная зависимость между осадкой и сопротивлением грунта на боковой поверхности сваи;

2–3 — переход грунта на боковой поверхности сваи в предельное состояние, завершающийся его достижением.

С учетом этого зависимость между осадкой сваи и сопротивлением грунта на ее боковой поверхности аппроксимируется следующей трехчленной формулой:

$$s = s_0 + K(\tau - \tau_0) + s_p \frac{\tau/\tau_l - 1}{f - \tau}\tau, \qquad (13)$$

где s — полная осадка сваи; s_0 — осадка сваи, соответствующая окончанию i этапа («включению» в работу конца сваи); τ — среднее удельное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи при осадке s τ_0 —то же, соответ-

ствующее окончанию I этапа; K— коэффициент пропорциональности между перемещением сваи и сопротивлением грунта; τ,— удельное сопротивление грунта, соответствующее окончанию II этапа, f — предельное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи, s^s — коэффициент нелинейной составляющей осадки сваи, имеющий размерность перемещения.

Сопротивление τ_0, коэффициент K и осадку s_l, соответствующую пределу пропорциональной зависимости между осадкой и сопротивлением грунтов на боковой поверхности, определяют по результатам испытаний свай малого сечения обычной конструкции на вдавливание, принимая условие, что они не зависят от диаметра сваи.

Сопротивление τ_0 определяют по формуле:

$$\tau_0 = P_0/\pi d_m h, \tag{14}$$

где P_0 — нагрузка на сваю малого сечения, соответствующая включению в работу конца сваи и определяемая по графику «осадка — нагрузка», исходя из условий о распределении сопротивлений по длине сваи в грунте h; d_m — диаметр сваи малого сечения.

В соответствии с соображениями, изложенными на графике «осадка — нагрузка» включению в работу конца сваи соответствуют значения P_0 и s_0, равные абсциссе и ординате точки касания с графиком прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом $\beta = \operatorname{arctg} mh/E_pA$ (где m — коэффициент, учитывающий распределение нагрузки по боковой поверхности сваи; E_p — модуль упругости материала сваи; A — площадь поперечного сечения сваи). Легко показать, что при прямоугольном (равномерном) распределении по длине h удельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи коэффициент m равен 1/2, а при треугольном распределении (с убыванием сопротивления до 0 по мере приближения к нижнему концу сваи) — 2/3. Учитывая, что фактическое распределение указанного сопротивления находится между прямоугольным и треугольным, значение коэффициента m с достаточной для практических целей точностью можно принять равным 0,6, и соответственно угол β составит

$$\operatorname{arctg} 0{,}6h/E_pA.$$

По найденному значению осадки для сваи малого сечения s_{0m} находят значение осадки s для натурной сваи по формуле:

$$s_{0n} = s_{0m} d_m/d_n, \tag{15}$$

где d_m и d_n — диаметры соответственно сваи малого сечения и натурной сваи.

Осадку s_l находят как предел пропорциональности осадки сваи действию вертикальной нагрузки; при этом условие пропорциональности считается выполненным, если различие приращений осадок на соседних ступенях приложения нагрузки не превышает 30%:

$$1.3(s_i - s_{i-1}) \geq s_{i+1} - s_i, \tag{16}$$

где S_i — стабилизированная осадка сваи на i-й ступени нагружения.

Невыполнение условия (16) на i-й ступени характеризует $s_l = s_i$.

Коэффициент пропорциональности K определяют в интервале осадок $s_0 < s \leq s_i$ по формуле:

$$K = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s_i - s_0)/(\tau_i - \tau_0), \tag{17}$$

где τ_i — среднее удельное сопротивление грунта на i-й ступени нагружения; n — число ступеней нагружения.

Сопротивление τ_i как для сваи малого сечения, так и для натурной сваи определяют по формуле:

$$\tau_l = \tau_0 + \frac{s_l - s_0}{K}. \tag{18}$$

Коэффициент s_p определяют по результатам испытаний свай малого сечения с воздушной полостью на вдавливание или свай обычной конструкции на выдергивание, принимая его не зависящим от диаметра сваи:

$$s_p = s_m - s_m^l, \tag{19}$$

где s_m — осадка сваи при сопротивлении $\tau_m = \sqrt{f\tau_l}$; s_m^l — линейная составляющая осадки s_m (рис. 2.6.24).

График зависимости сопротивления грунта под нижним концом сваи малого диаметра от осадки строится путем сопоставления экспериментального графика, полученного при испытаниях сваи обычной конструкции на вдавливание с графиком развития сопротивления грунта на боковой поверхности сваи, построенным с использованием формулы (13); при этом удельное сопротивление грунта под нижним концом сваи определяется как частное от деления разности общей нагрузки и общего сопротивления грунта на боковой поверхности на площадь поперечного сечения сваи.

Прогнозирование графика зависимости сопротивления грунта под нижним концом натурной сваи от осадки осуществляется с использованием приведенного соотношения между перемещениями нижних концов натурной

сваи Δ_n и сваи малого сечения Δ_m при одинаковом значении удельного сопротивления грунта q под их нижними концами:

$$\Delta_n = \Delta_m d_m / d_n. \qquad (20)$$

При этом перемещения нижних концов свай находятся как разница между полной осадкой сваи s и деформацией ее ствола δ, возникающей вследствие трения грунта на боковой поверхности и сопротивления под нижним концом:

$$\delta = s_0 + 2.4(\tau - \tau_0)\frac{h^2}{E_p d} + \frac{qh}{E_p}. \qquad (21)$$

Построение графика «осадка — нагрузка» для натурной, буронабивной сваи производится путем суммирования расчетных графиков зависимостей «осадка — сопротивление грунта под нижним концом» и «осадка — сопротивление грунта на боковой поверхности», получаемых по описанной методике с учетом площадей поперечного сечения и боковой поверхности натурной сваи. На рисунке 2.6.25 дан алгоритм, позволяющий запрограммировать построение такого графика и выполнять все необходимые расчеты на простейших ЭВМ.

Рассмотренная методика прогнозирования может быть оценена по рисунку 2.6.26, на котором приведено сопоставление экспериментальных графиков «осадка — нагрузка» и расчетных. Как видно из рисунка, максимальное отклонение расчетных значений нагрузки от экспериментальных при равных значениях осадки сваи не превышает 20%.

Дополнительная проверка разработанного метода прогнозирования графиков «осадка — нагрузка» проведена по результатам испытаний натурных буронабивных свай и свай малого сечения, выполненных ГПП «Фундаментпроект» при производстве инженерно-геологических изысканий на Таганрогском комбайновом заводе (площадка № 1), Прикумском заводе пластмасс (площадка № 2) и на площадке строительства Загорской ГАЭС (площадка № 3), а также приведенных в статье Ф. Лицци [39] (площадка № 4).

Грунтовые условия площадки № 1 представлены до глубины 0,8-2,5 м насыпными грунтами, ниже — лессовидными суглинками твердой консистенции мощностью Н,4–13,2 м. Испытанные сваи имели длину 10 м и диаметр 0,3 и 0,6 м. Площадка № 2 сложена лессовидными суглинками полутвердой консистенции до глубины 10–12 м просадочными, ниже — непросадочными. Сваи длиной 16 м и диаметром 0,25 и 6,6 м испытывали после замачивания их основания до полного водонасыщения. Площадка № 3 сложена мореными

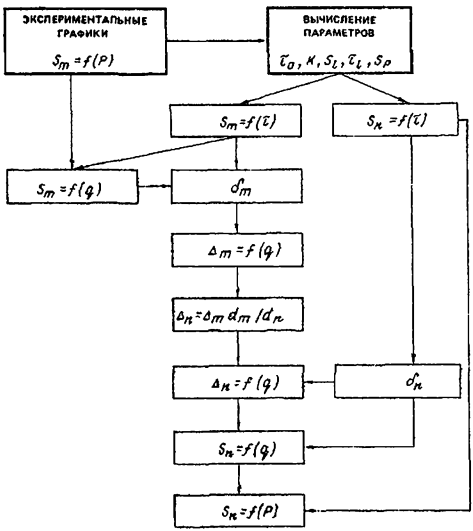


Рис. 2.6.26. Алгоритм прогнозирования графиков «осадка — нагрузка» для сваи натурных диаметров по результатам испытания опытных свай малого диаметра

суглинками с прослоями и включениями гравия. Испытанные сваи имели длину 10 м и диаметр 0,25 и 1,05 м.

Грунтовые условия площадки № 4 на глубину устройства свай длиной 20 м представлены песками с примесью вулканического пепла с прослоями ила и глинистых грунтов, с глубины 4,5 м водонасыщенными песками. Диаметр испытанных свай — 0,25 и 0,8 м.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных графиков «осадка — нагрузка» для площадок приведены на рисунке 2.6.26. На рисунках 2.6.26 и 2.6.27 видно, что для достаточно широкого диапазона изменения грунтовых условий, длин и диаметров буронабивных свай наблюдается хоро-

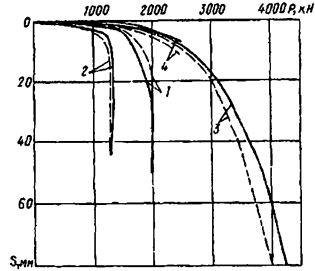


Рис. 2.6.27. Сопоставление экспериментальных графиков «осадка — нагрузка» для сваи НС с рассчитанными по предлагаемой методике на производственных площадках:
1 — № 1; 2 — № 2; 3 — № 3; 4 — № 4;
——— — экспериментальные графики;
– – – – — расчетные графики

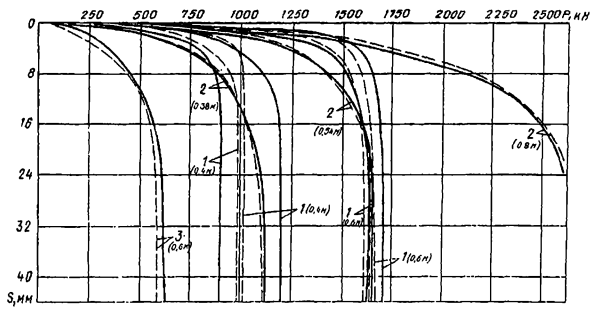


Рис. 2.6.28. Сопоставление экспериментальных графиков «осадка — нагрузка» для сваи НС с рассчитанными по предлагаемой методике на опытных площадках:
1 — г. Набережные Челны (сваи длиной 16, диаметром 0,4 и 0,6); 2 — г. Тирасполь (13 и 0,38 м; 0,54 и 0,8 м); 3 —г. Николаев (8 и 0,6 м)

шее соответствие прогнозируемых графиков графикам, полученным при испытаниях. Несущая способность натурных буронабивных свай по данным испытаний опытных свай малого сечения определяется так же, как и для забивных свай по данным испытаний эталонных свай — по формуле (12); при этом предельное сопротивление натурной сваи находят по прогнозируемому графику «осадка — нагрузка» в соответствии с теми же правилами, что и по экспериментальному графику «осадка — нагрузка» при испытаниях натурных свай статическими нагрузками.

Раздел 3. ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Глава 3.1. ПРОХОДКА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

3.1.1. Основные требования к способам проходки и конструкциям гидрогеологических скважин

Требования к способам проходки и конструкциям гидрогеологических скважин зависят от целевого назначения (категории) скважин, геолого-гидрогеологических особенностей района, технико-экономических условий бурения и специфики их последующего использования. В общем случае это получение необходимого объема достоверной гидрогеологической информации, качественное опробование изучаемых водоносных горизонтов и выполнение остальных функций скважины в соответствии с ее целевым назначением при минимально возможных затратах труда, времени и средств.

Категории гидрогеологических скважин. По целевому назначению выделяют следующие основные категории гидрогеологических скважин: 1) поисковые, 2) разведочные, 3) разведочно-эксплуатационные, 4) наблюдательные, 5) эксплуатационные (водозаборные, дренажные, нагнетательные, поглощающие и др. Для выполнения гидрогеологических задач в процессе поисков и разведки подземных вод используются преимущественно скважины первых четырех категорий. Эксплуатационные скважины предназначаются для эксплуатации подземных вод, их удаления, регулирования и других целей.

Поисковые скважины бурятся на стадии поисков и в процессе поисково-съемочных работ. Они предназначены для изучения общих геолого-гидрогеологических условий, выявления водоносных горизонтов и комплексов, их прослеживания и предварительного количественного и качественного опробования (отбор проб, пробные откачки, экспресс-опробование и пр.).

Разведочные скважины проходятся в процессе разведки перспективных участков месторождений подземных вод в целях их более детального гидрогеологического изучения и выявления условий народнохозяйственного использования или освоения. В разведочных скважинах выполняется большой комплекс гидрогеологических и других видов исследований (опытные и опытно-эксплуатационные откачки, наливы, нагнетания; отбор проб пород,

воды и газа; расходометрические, термометрические, геофизические и другие наблюдения). Для обоснованного геолого-гидрогеологического расчленения разреза поисковых и разведочных скважин в них осуществляется отбор керна, выполняется комплекс каротажных методов и необходимый комплекс гидрогеологических наблюдений.

Разведочно-эксплуатационные скважины сооружаются в процессе разведочных работ, и после проведения на них полного комплекса гидрогеологических и других видов исследований (т. е. выполнения функций разведочной скважины), они передаются для использования при последующей эксплуатации месторождения. Естественно, что конструкции таких скважин должны обеспечивать нормальную многолетнюю и беспрерывную их эксплуатацию.

Наблюдательные скважины могут закладываться на любой из стадий поисково-разведочных работ и в зависимости от назначения использоваться либо для наблюдений за режимом подземных вод в период их разведки и эксплуатации (наблюдения за естественным или нарушенным режимом), либо для наблюдений за изменением показателей подземных вод (уровня, химического состава, температуры и др.) в процессе проведения опытных гидрогеологических работ (откачек, наливов, нагнетаний, индикационных измерений и др.).

В процессе проведения поисково-разведочных работ и эксплуатации подземных вод может возникать необходимость использования поисковых скважин в качестве разведочных, поисковых и разведочных в качестве наблюдательных и т. д. Возможность такого перевода скважин из одной категории в другую следует предусматривать при проектировании разведочных работ. Это может существенно повысить их геологическую и экономическую эффективность.

Таким образом, даже общее рассмотрение задач и назначения отдельных категорий скважин показывает необходимость их обязательного учета при выборе способа бурения и конструкций гидрогеологических скважин.

Способы бурения гидрогеологических скважин

Способы бурения гидрогеологических скважин выбираются в зависимости от местных геолого-гидрогеологических условий, целевых задач исследований, глубины и диаметра проектируемых скважин и других факторов. Данные бурения должны обеспечивать получение необходимого объема геолого-гидрогеологической информации, успешное выполнение целевых задач сооружаемой скважины и высокие технико-экономические показатели бурения и выполняемых исследований.

Для сооружения гидрогеологических скважин применяют следующие способы бурения: вращательный с прямой промывкой, вращательный с продувкой, вращательный с обратной промывкой, ударно-канатный, комбинированный, реактивно-турбинный, колонковый. Предпочтительны для проходки гидрогеологических скважин — вращательный (с прямой и обратной промывкой и продувкой), ударно-канатный и комбинированные способы бурения, для сооружения глубоких скважин — вращательный (роторный), реактивно-турбинный, колонковый. Ниже изложены рекомендации по выбору способов бурения гидрогеологических скважин и обеспечению их опробования.

Вращательный способ с прямой промывкой целесообразно применять при бурении гидрогеологических скважин любой глубины в хорошо изученных геолого-гидрогеологических условиях при отсутствии в разрезе часто переслаивающихся слабонапорных и малодебитных водоносных горизонтов. В процессе проходки опробуемых интервалов для отбора керна целесообразно использовать колонковые снаряды. Для опробования водоносных горизонтов следует применять пластоиспытатели, расходометрию и каротаж (геофизические исследования проводят как в процессе бурения, так и после). Для уменьшения последствий глинизации водоносных горизонтов рекомендуется практиковать способы посадки фильтров без глинизации (гидроподмывом, эрлифтной прокачкой, ударным способом), бурение с промывкой чистой водой, слабоглинистыми естественными и аэрированными растворами, эффективные методы разглинизации и т. д. Вращательный способ бурения с промывкой обеспечивает возможность быстрого сооружения глубоких скважин, применение упрощенных их конструкций, высокие технико-экономические показатели буровых работ.

Вращательное бурение скважин с обратной промывкой рекомендуется применять для проходки разведочно-эксплуатационных и эксплуатационных скважин глубиной до 300 м, диаметром до 1000 мм и более в рыхлых породах (без включения валунов) при глубине залегания уровня подземных вод более 3 м от поверхности, при наличии значительного количества воды для бурения и благоприятных температурных условий (выше 0 °С).

Вращательный способ бурения скважин с продувкой эффективен при сооружении скважин в безводных районах, в районах развития многолетнемерзлых пород (до глубины 200–300 м), а также в условиях развития слабоводообильных водоносных горизонтов (с дебитами скважин до 2–3 л/с). Породы разреза должны быть устойчивы против обрушения.

Ударно-канатный способ следует использовать для бурения гидрогеологических скважин в слабо изученных геолого-гидрогеологических условиях, при частом переслаивании и небольшой напорности водоносных горизонтов

и необходимости проходки скважин глубиной до 100–150 м, в валунно-галечниковых отложениях с большими начальными диаметрами. Для посадки и извлечения обсадных труб обязательны вибромеханизмы. Ударно-канатный способ обеспечивает высокое качество опробования и каптажа водоносных горизонтов, не требует доставки воды и глины, но отличается незначительными скоростями бурения и большим расходом обсадных труб.

Комбинированный способ рекомендуется применять для бурения скважин в слабо изученных геолого-гидрогеологических условиях, при частом переслаивании слабонапорных водоносных горизонтов, удовлетворительных условиях передвижения буровых установок и достаточном объеме буровых работ. Верхняя часть разреза вплоть до водоносных пород проходится вращательным (роторным) способом, а водоносные породы — ударно-канатным. Такая комбинация обеспечивает достаточно быстрое сооружение скважин, их удовлетворительную геолого-гидрогеологическую документацию и высокое качество работ по вскрытию и опробованию водоносных горизонтов.

Комбинированный и ударно-канатный способы наиболее целесообразно использовать при бурении разведочных, разведочно-эксплуатационных и эксплуатационных гидрогеологических скважин.

Реактивно-турбинный способ целесообразно использовать для бурения скважин диаметром более 1 000 мм и глубиной не менее 200 м. Он характеризуется высокой скоростью проходки скважин и очень низким выходом керна, поэтому его применяют для бурения эксплуатационных и разведочно-эксплуатационных скважин на глубокие водоносные горизонты.

Колонковым способом возможна проходка гидрогеологических скважин диаметром до 200 мм в скальных породах.

Установку для бурения гидрогеологических скважин выбирают исходя из геолого-технических условий, глубины и диаметра бурения, состава пород и других факторов.

Требования к конструкциям и оборудованию гидрогеологических скважин

Конструкции гидрогеологических скважин определяются их целевым назначением, конечным диаметром, глубиной и способом бурения, характером разреза, способом опробования и другими факторами.

К конструкциям гидрогеологических скважин различных категорий предъявляются определенные требования. Они должны обеспечивать:

1) эффективное и безопасное проведение работ по проходке скважины и вскрытию водоносных горизонтов;

2) качественное опробование всех изучаемых водоносных горизонтов и их соответствующую изоляцию;
3) размещение в скважине водоподъемного оборудования, испытательных снарядов и измерительных приборов;
4) эффективное и качественное выполнение необходимого комплекса гидрогеологических наблюдений и исследований;
5) защиту водоносных горизонтов от загрязнений;
6) надежность и устойчивость условий использования скважины в соответствии с ее назначением;
7) возможность сооружения скважины с минимальными затратами труда, времени и средств;
8) быстрое и эффективное выполнение ремонтных и ликвидационных работ (при необходимости) и возможность повторного использования обсадных труб и фильтров.

Перечисленные требования и геолого-технические условия проходки скважин определяют конструктивные особенности отдельных категорий гидрогеологических скважин: их глубину и диаметры, количество колонн обсадных труб, их диаметры и глубины (интервалы) спуска, способ оборудования водоприемной части, методы изоляции и опробования водоносных горизонтов, устьевое и другое оборудование скважин (рис. 3.1).

Глубина гидрогеологических скважин определяется положением изучаемого водоносного горизонта в разрезе, его мощностью и необходимой глубиной его вскрытия. Небольшие по мощности водоносные горизонты (до 10–20 м), как правило, вскрываются полностью.

Глубина вскрытия значительных по мощности водоносных горизонтов должна быть достаточной для обеспечения проектного дебита при опробовании и эксплуатации гидрогеологических скважин (поисково-разведочных и разведочно-эксплуатационных) и осуществления замеров при изменении уровня в наблюдательных скважинах. Если предпо-



Рис. 3.1. Основные элементы конструкции гидрогеологической скважины: 1 — устье скважины; 2 — первая обсадная колонна; 3 — статический уровень воды; 4 — динамический уровень воды; 5 — эксплуатационная колонна; 6 — сальник; 7 — подфильтровая колонна; 8 — рабочая часть фильтров; 9 — отстойник; 10 — пробка; 11 — цементный стакан

лагается опробование скважины эрлифтом, то должны быть учтены оптимальные параметры эрлифта (спуск воздухопроводных труб должен обеспечивать коэффициент погружения не менее 1,5–2,5).

При обосновании конструкций гидрогеологических скважин определяющее значение имеет выбор эксплуатационного, конечного и начального их диаметров.

Эксплуатационный диаметр скважины (диаметр в пределах глубины установки водоподъемного оборудования) должен быть достаточным для размещения предназначенного для опробования или эксплуатации скважины насосного оборудования (обычно он принимается на 50–100 мм больше диаметра насоса). Конечный диаметр и диаметр водоприемной части скважины зависят от принятого эксплуатационного диаметра, глубины скважины, типа и конструкции предполагаемого к установке фильтра. Конечный диаметр гидрогеологических скважин должен обеспечивать установку соответствующего фильтра, получение необходимого дебита скважины, условия ее длительной эксплуатации, а также проведение необходимых гидрогеологических наблюдений и исследований. В таблице 3.1 приведены значения минимальных конечных диаметров для различных категорий гидрогеологических скважин при вращательном и ударно-канатном способах их сооружения. Начальный диаметр бурения определяется с учетом необходимости спуска промежуточных обсадных колонн, способа изоляции водоносных горизонтов и возможности размещения в скважине насоса требуемой производительности.

Количество колонн обсадных труб, их диаметры и глубины спуска определяются геолого-литологическим разрезом, глубиной залегания водоносного горизонта, условиями изоляции водоносных пластов, принятым эксплуатационным диаметром скважины и способом ее бурения.

Эти элементы конструкции гидрогеологической скважины должны обеспечивать надежную изоляцию продуктивного горизонта от других водоносных горизонтов и от поверхности, отвечать наиболее оптимальному режиму технологии ее бурения и условиям последующей эксплуатации, ремонта и восстановления.

В конструкциях скважин обсадные трубы должны приниматься телескопическими с колоннами: шахтовое направление, кондуктор, эксплуатационная и фильтровая. В сложных гидрогеологических условиях для перекрытия не закрепленных кондуктором водоносных или неустойчивых пород в скважинах необходимо устанавливать дополнительные (технические) колонны труб, подлежащие последующему извлечению.

Таблица 3.1

Категория скважины	Минимальное проходное сечение, мм	Диаметр бурового наконечника при вращательном способе бурения, мм			Диаметр бурового наконечника при ударном бурении, мм	
		без осадки призабойной зоны трубами	при осадке призабойной зоны трубами без цементации	при осадке призабойной зоны трубами с цементацией	без осадки призабойной зоны трубами	при осадке призабойной зоны трубами
Поисковые и разведочные	80–90	91	91	161–190	80	110
Разведочно-эксплуатационные	80–100	91	110	190	90	130
Эксплуатационные	80–100	91	110	190	110	130
Наблюдательные:						
а) при установке автоматических приборов	75–80	75	91–110	161–190	75–91	91
б) без установки автоматических приборов	40–50	45,5	75–91	151	24,5–58,5	75

Конструкция скважин ударного бурения характеризуется сравнительно большим числом обсадных колонн (от 2–3 до 5–6), что связано с необходимостью закрепления пройденного бурением интервала через 30–40 м (при специальных методах посадки колонн через 50–100 м). Значительное уменьшение числа колонн обсадных труб и упрощение конструкций гидрогеологических скважин обеспечивается при вращательном и комбинированном способах их сооружения. На рисунке 3.2 приведены конструкции гидрогеологических скважин, пройденных ударным и вращательным способами. При вращательном способе за счет более совершенной технологии бурения возможно применение одно- и двухколонных конструкций скважин с посадкой фильтров «впотай» или вскрытием водоносных горизонтов путем перфорации обсадных колонн.

Водоприемная часть гидрогеологических скважин в зависимости от степени устойчивости водоносных пород устраивается фильтровой или бесфильтровой (в устойчивых трещиноватых породах и мелкозернистых песках).

Фильтры гидрогеологических скважин должны обеспечивать благоприятные условия для притока воды, не допускать пескования и глинизации, не ухудшать качества воды, обладать малым сопротивлением, быть устойчивыми, долговечными и экономичными. Согласно действующим рекомендациям необходимо использовать в полускальных неустойчивых, щебенистых, гравийно-галечниковых и песчано-гравийных водоносных породах трубчатые (с круглой и щелевой перфорацией), трубчатые с проволочной обмоткой и стержневые фильтры (без обмотки либо с водоприемной частью из нержавеющей проволочной обмотки или штампованного листа); в крупно- и среднезернистых песках (с преобладающим содержанием частиц фракции > 0,25 мм) трубчатые и стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, стального штампованного листа или сетки квадратного и галунного плетения, иногда с однослойной гравийной обсыпкой; в мелкозернистых и глинистых песках (с преобладанием фракции > 0,1 мм) трубчатые и стержневые с одно-, двух- или трехслойной песчано-гравийной обсыпкой (гравийные фильтры). Для наблюдательных скважин целесообразны фильтры с близкой к водоносным породам проницаемостью (проволочные, сетчатые и из штампованных материалов). Длину рабочей части фильтра l_0 в напорных горизонтах небольшой мощности (до 10 м) следует принимать равной мощности пласта, в безнапорных — мощности горизонта за вычетом возможного понижения (фильтр должен быть затоплен). В более значительных по мощности водоносных горизонтах ее определяют, исходя из условий обеспечения проектного дебита скважины Q, ориентировочно по эмпирической зависимости:

$$l_0 = aQ/d,$$

где Q — проектный дебит скважины в м^3/ч; d — наружный диаметр фильтра в мм; a — эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от коэффициента фильтрации водоносных пород в пределах от 30 (для высокопроницаемых песчаногравийных пород) до 90 (для мелкозернистых песков).

Как показывают опыт и расчеты, в подавляющем большинстве скважин длина рабочей части фильтра l_0 может приниматься из условий обеспечения соотношения l_0/m в пределах 0,5–0,8 (здесь m — полная мощность вскрытого скважиной водоносного горизонта). В наблюдательных скважинах интервал вскрытия водоносного горизонта и длина рабочей части фильтра устанавливаются

с учетом обеспечения замеров уровня воды при самом низком его положении (при этом верх рабочей части фильтра должен быть на 2–3 м ниже уровня).

Для успешной установки фильтра в скважине конечный ее диаметр должен быть на 50–100 мм больше наружного диаметра фильтра, а при устройстве гравийных фильтров необходимо учитывать толщину гравийной обсыпки. Состав гравийной обсыпки и размеры проходных отверстий фильтров (d_0) подбираются исходя из соотношения $d_0 = (1{,}5 \div 4)\ d_{50}$, где d_{50} — диаметр частиц, содержание которых в обсыпке по массе составляет 50%. Это же соотношение следует учитывать и при устройстве фильтров без гравийной обсыпки (при условии, что d_{50} определен для водоносных пород). Подбор материала гравийной обсыпки осуществляется в зависимости от гранулометрического состава водоносных пород с учетом выполнения соотношения d_{50} обсыпки: d_{50} породы = 8÷12.

В целях проведения качественного гидрогеологического и гидрохимического опробования отдельных водоносных пластов и горизонтов в процессе бурения скважин или после завершения их проходки необходима тщательная изоляция опробуемого интервала от смежных в разрезе пластов и горизонтов. Изоляция отдельных водоносных горизонтов и водопроницаемых пластов осуществляется также в связи с необходимостью исключения перетоков воды из одного пласта в другой, перекрытия поглощающих горизонтов, предотвращения загрязнения водоносных пластов, обеспечения устойчивости стенок скважины и для других целей. В зависимости от способа бурения и целевого назначения изоляция водоносных горизонтов и испытуемых интервалов в скважинах осуществляется перекрытием их обсадными трубами с задавливанием колонн труб в естественные или искусственно создаваемые глинистые слои, выполнением затрубной или надбашмачной цементации обсадных колонн, установкой специальных цементных мостов, тампонов и сальников, применением различного рода пакеров, а также специальных схем и методов опробования водоносных горизонтов (раздельное опробование водоносных горизонтов, опережающее опробование, использование специальных испытателей пластов).

Распространенным и простым способом изоляции водоносного горизонта является спуск обсадных колонн и задавливание их башмака в подстилающие водоносный горизонт водоупорные глинистые породы на глубину 3–5 м (рис. 3.2, А). Если подстилающий водоупор ненадежен или представлен скальными породами, то вдавливание башмака колонны обсадных труб осуществляется в специальный глинистый тампон, создаваемый искусственно на забое скважины из жирной тампонажной глины (набрасывается в скважину в виде

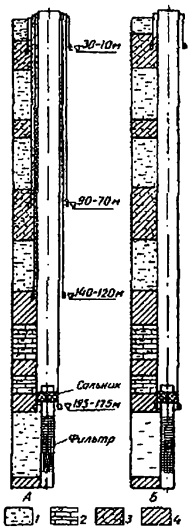


Рис. 3.2. Схематические разрезы скважин глубиной до 200 м. Скважины, пройденные ударным (А) и вращательным (Б) способами: 1 — песок водоносный; 2 — известняк водоносный; 3 — глины песчаные; 4 — глины

шариков либо доставляется на забой в специальных трубах и затем выдавливается из них). При скальном водоупоре для создания глинистого тампона разбуривается специальный карман (с помощью специальных расширителей или долота с эксцентриситетом), заполняемый тампонажной глиной. Возможно заполнение стакана цементом для цементации башмака обсадной колонны.

В дальнейшем глинистая или цементная пробка внутри обсадной колонны разбуриваются. Качество изоляции водоносного горизонта проверяется откачкой или наливом воды при ударном способе бурения и нагнетанием воды при роторном бурении. Неизменность уровня воды в скважине после откачки свидетельствует о высоком качестве изоляции горизонта.

Для более надежной и длительной изоляции водоносных горизонтов, пластов и интервалов применяется цементация башмаков обсадных труб, манжетная цементация или цементация колонн обсадных труб в целом, для чего используется тампонажный цемент специальных марок. Цементация обсадных колонн (затрубная цементация) применяется для надежной изоляции испытуемого горизонта от вышележащих. Для этой цели все вышележащие горизонты перекрываются колонной обсадных труб, затрубное пространство которой цементируется от башмака до устья скважины или на определенную высоту (рис. 3.2, Б).

Диаметр бурения изолируемой части скважины при цементации принимается на 50–120 мм больше диаметра цементируемых труб. Если нижележащий водоносный горизонт, подлежащий опробованию или эксплуатации, является высоконапорным с уровнем выше устья, цементация обсадных колонн обязательна до устья скважины.

Технически цементация осуществляется различными способами (через заливочные трубки, с помощью цементировочных головок и разделяющих про-

бок и т. п.). При больших глубинах бурения и благоприятных гидрогеологических условиях (отсутствие гидравлической взаимосвязи горизонтов, слабая агрессивность вод) можно ограничиться лишь подбашмачной цементацией обсадных колонн. Если обсадную колонну спускают в скважину вместе с установленным на ее конце фильтром и возникает необходимость в цементации некоторого интервала затрубного пространства выше фильтра, применяется *манжетная цементация*. Подаваемый через специальные клапанные отверстия в стенках обсадной колонны цементный раствор цементирует затрубное пространство на некоторую высоту, образуя изолирующую манжету. Манжетную цементацию используют также для изоляции одного от другого смежных в разрезе водоносных горизонтов (пластов). Перед проведением манжетной цементации обязательна разглинизация намечаемого к опробованию горизонта.

В некоторых стволах скважин (большая глубина скважин, частое переслаивание пород разной твердости, агрессивность подземных вод) для изоляции водоносных горизонтов применяется затрубная цементация обсадных колонн (в том числе хвостовиков) с последующим вскрытием опробуемых горизонтов или интервалов прострелом труб перфораторами или другим способом (рис. 3.3).

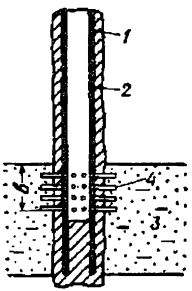


Рис. 3.3. Схема затрубной цементации обсадной колонны труб и вскрытия водоносного пласта перфорацией:
1 — обсадная колонна труб; 2 — цементный стакан; 3 — водоносный пласт; 4 — перфорационные каналы; *в* — вскрытая мощность пласта

Рассмотренные способы изоляции водоносных горизонтов требуют значительного времени, повышенных финансовых расходов и затрат труб, обязательного использования новой колонны обсадных труб для опробования каждого следующего горизонта с уменьшением диаметра скважины на 100–150 мм, поэтому их использование становится нецелесообразным и затруднительным, если скважиной предполагается вскрыть и последовательно опробовать несколько горизонтов (более 2–3). В таких условиях целесообразно применять специальные схемы и методы опробования с разделением или изоляцией опробуемых горизонтов или интервалов с помощью временных тампонов, пакеров, пробок, сальников и т. д. Например, в устойчивых породах целесообразно раздельное опробование горизонтов по схеме «сверху вниз». Для этого проходка скважины ведется до проектной

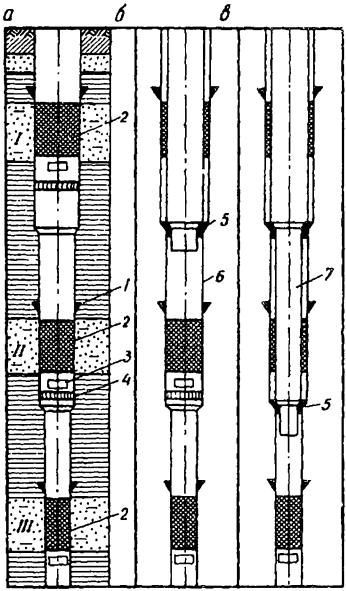


Рис. 3.4. Одноколонная конструкция скважины вращательного бурения с тремя фильтрами: *а* — опробование первого (*I*) водоносного горизонта; *б* — опробование второго (*II*) водоносного горизонта; *в* — опробование третьего (*III*) водоносного горизонта; 1 — эластичный сальник; 2 — фильтр; 3 — промывочное окно; 4 — цементная пробка; 5 — сальник пеньковый; 6 — обсадная колонна труб; 7 — вспомогательная колонна труб

отметки без крепления её стенок. После проведения геофизических исследований намеченные для опробования интервалы разобщают цементными мостами, устанавливаемыми последовательно снизу вверх путем расклинивания деревянного клина, на который заливают цемент через колонну труб. Исследования горизонтов ведутся последовательно сверху вниз с перекрытием опробованного интервала обсадными трубами до цементного моста, его разбуриванием и испытанием нового интервала.

В других условиях предназначенные для опробования горизонты каптируются одной колонной обсадных труб с установкой на ней фильтров для каждого из горизонтов и разобщением этих фильтров цементными мостами внутри обсадной колонны (рис. 3.4). Опробование горизонтов осуществляется последовательно сверху вниз с использованием специальной водоподъемной колонны с эластичным сальником для изоляции уже опробованного интервала. После извлечения водоподъемной колон-

ны может быть проведено суммарное опробование всех каптированных обсадной колонной горизонтов. Разглинизация горизонтов при этом способе опробования производится либо комбинированным способом, либо обратно всасывающей промывкой через промывочные окна, устанавливаемые в нижней части фильтров.

Эффективным и перспективным специальным методом опробования вскрываемых при бурении скважины горизонтов является метод *опережающего опробования*, обеспечивающий опробование вскрываемых скважиной пластов и горизонтов без существенного изменения технологии бурения. После вскрытия пласта, намеченного к опробованию, бурение прекращается, промывают скважину качественным глинистым раствором (чем и обеспечивается изоляция испытуемого горизонта от вышележащих), извлекают буровой наконечник и на буровых трубах опускают в скважину специальный фильтр-опробователь (промывочного или шнекового типа). После введения фильтра в испытуемый горизонт (с расходкой и гидроподмывом) замеряется уровень воды в буровых трубах и осуществляется откачка (рис. 3.5).

Для временной изоляции в скважине испытуемых интервалов и горизонтов широко используются специальные пакеры (тампоны), которые опускаются на заданную глубину в скважине, устанавливаются (различными способами) и после опробова-

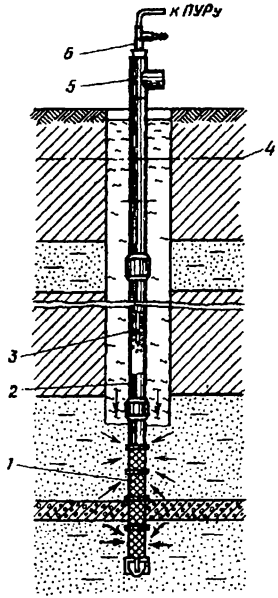


Рис. 3.5. Схема опережающего опробования водоносных горизонтов: 1 — фильтр-опробователь; 2 — бурильные трубы; 3 — воздушные трубы эрлифта; 4 — уровень подземных вод опробуемого горизонта; 5 — тройник для слива воды; 6 — тройник на воздушной линии с уплотнительной пробкой; ПУР — пневматический уровнемер

ния изолируемого ими интервала извлекаются из скважины. В зависимости от способа опробования пакеры устанавливаются непосредственно перед испытуемым горизонтом, ниже его или выделяют интервал опробования, обеспечивая его изоляцию в разрезе сверху и снизу.

Конструктивно пакер представляет собой эластичную оболочку (в простейшем случае сальник), способную при изменении ее объема превращаться в изолирующий тампон (резиновые кольца, трубы, диски, надувные манжеты и т. п.). Пакерующие элементы широко применяются при гидрогеологическом опробовании скважин и горизонтов с помощью специальных испытателей и опробователей пластов, используемых в условиях устойчивых разрезов гидрогеологических скважин.

Определенные требования предъявляются к оборудованию устьевых частей гидрогеологических скважин. Оголовок скважины должен обеспечивать условия для регулирования процесса откачки или самоизлива, измерения уровней и дебита, отбора проб воды и газа, спуска измерительных инструментов, изоляцию скважины от атмосферных осадков и загрязнений и т. д. Особой спецификой отличается оборудование устья фонтанирующих и газирующих глубоких скважин (необходимость установки фонтанной арматуры, лубрикатора, газоотделителя, манометров и т. д.).

Разведочные и другие гидрогеологические скважины после выполнения ими своих функций подлежат обязательной ликвидации путем соответствующей санитарно-технической заделки (тампонажа) с выполнением мероприятий, исключающих перетекание подземных вод из одних водоносных горизонтов в другие и их загрязнение.

3.1.2. Проходка горизонтальных горных выработок, канав, шурфов

Проходка горизонтальных горных выработок при изыскании источников питьевого водоснабжения проводится реже, чем бурение скважин. Чаще гидрогеологические наблюдения проводятся в уже существующих выработках. Иногда в породах с малыми фильтрационными показателями проходят так называемые водосборные галереи, роют колодцы, шурфы и канавы.

Проведение горизонтальных выработок в крепких породах

В геологоразведочных партиях Министерства геологии РФ объем проходимых за год горных выработок составлет в среднем 280–290 тыс. м, причем более 95% из них — горизонтальные выработки. Почти все горные выработки (84%) проходятся по крепким породам с помощью буровзрывных работ.

Буровзрывные работы проводятся в соответствии с паспортами, разрабатываемыми для каждой горной выработки и утверждаемыми главным инженером или начальником геологоразведочной партии. Эффективность буровзрывных работ зависит в значительной степени от того, насколько правильно выбраны параметры буровзрывных работ – тип ВВ и способы взрывания зарядов, число и глубина шпуров в комплекте и схема их расположения в массиве породы, подлежащей отбойке в контурах сечения выработок. Правильно выбранная и выполненная схема расположения шпуров в забое обеспечивает отбойку породы от массива с равномерным дроблением ее без крупных кусков и с образованием компактного развала породы у забоя, что способствует успешной уборке ее.

Бурение шпуров в проходческом цикле занимает от 30 до 45% общей продолжительности цикла. В проходческом забое площадью 5,8–6,4 м^2 бурение шпуров чаще всего проводят два проходчика (при бурении перфораторами с пневмоподдержками), а при бурении с ЛКР-У один проходчик работает на двух колонках.

Взрывание шпуровых зарядов разрешается проводить только после подачи специального сигнала, который должен быть известен всем проходчикам и другим лицам, находящимся в шахте в пределах производства взрывных работ.

При огневом взрывании зарядов следует внимательно считать взрывы. При обнаружении отказа невзорвавшийся шпуровой заряд необходимо немедленно (по истечении времени проветривания) ликвидировать. Выходить из укрытия можно лишь с разрешения взрывника после взрыва всех зарядов.

Продолжительность заряжания и взрывания шпуров колеблется в значительных пределах от 7 до 16% времени цикла.

Проветривание выработок осуществляется с использованием главным образом осевых вентиляторов типа ВМ и СВМ и металлических или брезентовых прорезиненных трубопроводов. В практике проведения горно-разведочных выработок применяются все три способа проветривания: 27% выработок проветриваются по нагнетательной схеме, 28% — по всасывающей и 45% — по комбинированной.

Уборка породы — наиболее трудоемкий процесс проходческого цикла, занимающий 40–60% его продолжительности. В условиях геологоразведочных партий применяются в основном два способа уборки породы: с использованием скреперных установок в выработках с площадью поперечного сечения до 5 м^2 и погрузочными машинами при площади сечения выработок более 5 м^2. Производительность уборки породы в обоих случаях зависит от

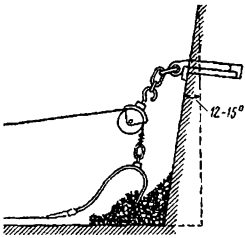


Рис. 3.6. Наклонная форма забоя в рассечке

многих факторов. Не исключая влияния факторов, зависящих от конструкции погрузочных машин и скреперных установок, отметим факторы организационного порядка, влияя на которые можно добиваться существенного повышения производительности уборки породы и сокращения продолжительности ее в проходческом цикле.

Объем крепления выработок в геологоразведочных партиях в среднем по геологоразведочной отрасли составляет около 30% объема проходки горизонтальных выработок. Недооценка значения крепления горных выработок и поддержания их в хорошем состоянии недопустима и может привести к несчастным случаям.

Проведение горизонтальных выработок в мягких однородных породах

В мягких однородных породах проведение горноразведочных выработок может осуществляться с использованием проходческих комбайнов, отбойных молотков без предварительного рыхления породы взрывами зарядов ВВ, отбойных молотков с предварительным разрыхлением породы взрывами зарядов ВВ и вручную с использованием простейших ручных инструментов. Проходческие комбайны в геологоразведочной отрасли пока не применяются, так как в мягких породах горно-разведочные выработки проводятся в ограниченных объемах, небольшой протяженности и малыми поперечными сечениями, а в таких условиях использование комбайнов современных конструкций, применяемых в угольной промышленности, экономически нецелесообразно. Таким образом, проходка горно-разведочных выработок в мягких породах проводится в основном отбойными молотками по породам до IV категории без использования ВВ и по породам IV–VI категорий — с предварительным рыхлением породы взрывами зарядов ВВ.

Вручную с использованием простейших ручных инструментов горно-разведочные выработки проходятся в исключительных случаях и в малых объемах в период поисковых работ и предварительной разведки месторождения.

Проходка горных выработок отбойными молотками без предварительного рыхления породы взрывами ВВ. Отбойка породы от массива

в контурах поперечного сечения горной выработки начинается с разработки вруба в прослойке наиболее мягких пород на глубину 20–40 см, после чего осуществляется отбойка породы в направлении к врубу заходками на величину вруба. Отбойку породы целесообразно проводить от нижней части забоя к верхнему уступу.

Закончив отбойку породы первой заходки, разрабатывают новый вруб и цикл отбойки породы повторяют. В процессе проходки выработок в мягких породах особое внимание необходимо уделять поведению пород при их обнажении. При появлении малейших признаков неустойчивости пород кровли и боков выработки следует прекратить отбойку породы и немедленно приступить к креплению пройденного интервала выработки.

Крепление выработок, проводимых в мягких породах, является наиболее ответственным процессом, требующим особого внимания как проходчиков, так и лиц, ответственных за горнотехнический надзор. Крепежные рамы, согласно паспорту крепления, устанавливаются в зависимости от устойчивости пород всплошную (5 крепежных рам на 1 м проходки) или вразбежку (3 крепежные рамы на 1 м проходки). В выработке должен постоянно находиться необходимый запас крепежных материалов.

Проходка выработок отбойными молотками с предварительной отбойкой и рыхлением породы зарядами ВВ. В породах мягких, но достаточно плотных, при проведении горных выработок отбойными молотками в ряде случаев целесообразно предварительное разрыхление их энергией взрыва небольших зарядов ВВ. Для этой цели в средней части забоя взрывается небольшое число (3–5) шпуровых зарядов, с помощью которых отбивается и разрыхляется значительная часть породы, а оставшуюся часть ее в контурах выработки отбивают отбойными молотками. Порода убирается вручную. Если размеры поперечного сечения позволяют, то для погрузки породы используют погрузочную машину. Крепление, настилка рельсовых путей и наращивание вентиляционных и других трубопроводов проводятся в соответствии с паспортами крепления и вентиляции.

Проведение горизонтальных выработок в неоднородных породах

В результате систематического опробования забоев, кровли и почвы горных выработок накапливается объективная геологическая информация, позволяющая определять форму залегания полезного ископаемого и давать его количественную и качественную оценку. Выбор способа проходки этого типа выработок в условиях, когда забой представлен разными по твердости и практической значимости породами, зависит от ряда факторов: от условий зале-

гания полезного ископаемого и вмещающих пород, их твердости и мощности, а также возможности и целесообразности раздельной отбойки полезного ископаемого и вмещающих пород.

Если полезное ископаемое характеризуется меньшей твердостью, чем вмещающие породы, а ценность его большая (золото, радиоактивные руды), то целесообразна раздельная отбойка (выемка) полезного ископаемого. При раздельной выемке обеспечиваются (без дополнительных затрат) валовое опробование и попутная добыча ценного полезного компонента. В таких условиях отбойка при небольшой твердости полезного ископаемого может осуществляться отбойными молотками (с предварительным разрыхлением его взрывами зарядов ВВ или без разрыхления), а вмещающие породы отбиваются с помощью буровзрывных работ.

При проходке полевого штрека по контакту двух разновидностей пород забой располагают по отношению к разным породам так, чтобы более мягкие породы занимали большую часть забоя. В таких случаях затраты на буровзрывные работы уменьшаются, а производительность труда проходчиков повышается. При решении вопроса о том, как располагать забой по отношению к породам разной твердости, необходимо учитывать, что при пониженной устойчивости породы возможна необходимость крепления пройденного интервала, а в таких условиях может оказаться более целесообразным проходить выработку по более твердой породе, не требующей крепления.

Проведение наклонных выработок

Горные выработки с углом наклона более 5° в геологоразведочном процессе используются при разведке главным образом в осадочных породах. Проходятся они обычно по падению пласта, поэтому угол наклона их равен углу падения пласта.

Форма и размеры поперечных сечений наклонных выработок определяются в зависимости от угла наклона пласта, устойчивости горных пород и применяемых средств подъема породы. Прямоугольная форма принимается при проходке выработок с углом наклона более 30° и подъеме породы скипами. Трапециевидная форма придается наклонным выработкам, проводимым с углом наклона 30° по неустойчивым породам; подъем породы при наклоне менее 25° проводится в вагонах, а при углах наклона более 25° — в скипах. Сводчатая форма используется при проведении наклонных выработок по устойчивым породам с углом наклона менее 30°. Здесь, так же как и при трапециевидной форме выработок, подъем породы может проводиться в вагонах при углах 25° и менее и в скипах при углах более 25°.

Размеры поперечных сечений определяются по габаритам подъемных сосудов и зазорам, предусматриваемым правилами безопасности, с учетом обеспечения условий нормального проветривания горных выработок при их развитии.

Величина зазоров между подъемными сосудами и деревянной крепью наклонного ствола шахты должна быть не менее 250 мм, а при каменной и бетонной — 200 мм, между двумя подъемными сосудами — также не менее 200 мм. Скорость движения вентиляционной струи не должна превышать 8 м/с.

Проходка наклонных шахтных стволов. Проходка ствола начинается проведением работ по обустройству приустьевой части выработки, в состав которых входит разработка котлована и его крепления, а также и устройство устья ствола.

Разработка (рытье) котлована для наклонного ствола (рис. 3.7) осуществляется с помощью экскаватора с бульдозерным отвалом. В крепких породах при необходимости выполняются буровзрывные работы. Устье наклонной шахты на глубину не менее 10 м крепится монолитным бетоном; у устья устанавливаются металлические противопожарные двери. Одновременно с обустройством устья ствола шахты монтируется металлическая эстакада, строится здание для подъемной машины и устанавливается подъемная машина; строятся бытовой комбинат, механическая мастерская, компрессорная,

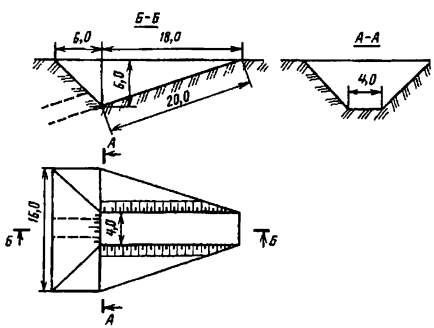


Рис. 3.7. Котлован для проходки наклонного ствола (размеры в м)

вентиляционная и другие производственные помещения. При проходке устья наклонного ствола, его креплении и других работах можно использовать временный подъем, а дальнейшая проходка шахтного ствола должна проводиться только по завершении монтажа стационарного подъема.

Бурение шпуров при проходке наклонного ствола в зависимости от крепости породы выполняется либо пневматическими перфораторами, либо горными электросверлами с соответствующими поддерживающими устройствами. Так как шахтный ствол проходится по падению полезного ископаемого, то шпуровой комплект бурится с клиновым горизонтальным врубом; глубина, количество шпуров и величина зарядов определяются по аналогии с комплектами шпуров, применяемых в горизонтальных выработках.

Взрывание зарядов — электрическое или электроогневое.

Проветривание уклонов при их проходке проводится по нагнетательной схеме осевым вентилятором, установленным на свежей струе воздуха в штреке.

Водоотлив при проходке наклонных стволов — сложный организационный и технологический процесс. Вода, поступающая из вышележащих пород, улавливается поперечными канавками, проходимыми в стволе через каждые 10–15 м, и направляется в продольную основную канавку, проводимую в процессе проходки ствола по одной из сторон ствола шахты. По продольной канавке вода поступает в промежуточный водосборник или при небольшом притоке накапливается в углу забоя против продольной канавки ствола. Из промежуточного водосборника или приямка у забоя вода откачивается центробежным или винтовым насосом на поверхность и сливается.

В зависимости от угла наклона, величины притока воды используются разные (простые) конструкции подвесных насосов: на канатах, на передвижных площадках.

Проходческая водоотливная установка должна обеспечивать своевременную откачку воды из забоя, затрату наименьшего рабочего времени на монтаж, хорошо работать на загрязненной воде, быть простой и надежной в управлении, не должна загромождать рабочее пространство.

3.1.3. Технические средства и приборы, применяемые при гидрогеологических исследованиях

При сооружении гидрогеологических скважин, их оборудовании и проведении гидрогеологических исследований применяются разнообразные технические средства и приборы.

Следует отметить, что помимо буровых агрегатов и смонтированных на них приспособлений для подготовки гидрогеологических скважин к исследо-

ваниям, проведения измерений и профилактического и капитального ремонтов на практике широко используются специальные агрегаты и станции: автоматическая электронно-каротажная станция, ремонтные агрегаты, механические лебедки, аппараты Яковлева (при исследованиях скважин глубиной до 1 000–2 400 м), портативные лебедки. К техническим средствам и приборам, применяемым при гидрогеологических исследованиях, относятся также водоподъемное оборудование для проведения откачек, комплекты оборудования для опытных нагнетаний, приборы для замеров уровней, температуры и расхода подземных вод, средства для изоляции испытуемых интервалов и водоносных горизонтов, специальные приборы и комплекты для гидрогеологического опробования скважин и водоносных горизонтов, различного рода пробоотборники и т. д.

Водоподъемное оборудование. Для проведения откачек из скважин используются различные виды водоподъемного оборудования: горизонтальные центробежные и самовсасывающие насосы, эрлифты, штанговые поршневые и вертикальные центробежные насосы и др.

Горизонтальные центробежные насосы применяются при положении динамического уровня при откачках не глубже 7 м. Самовсасывающие горизонтальные центробежные насосы позволяют проводить откачки при глубине динамического уровня от 9 до 20 м и дебитах скважин от 24 до 120 $м^3$/ч.

Наиболее часто для всех видов откачек из скважин (особенно выносящих песок) применяются эрлифты (воздушные водоподъемники), монтируемые по схеме «рядом» или «внутри» (рис. 3.8). Эрлифты обеспечивают проведение откачек при глубине динамического уровня до 100 м и более в широком диапазоне производительности (50–150 $м^3$/ч). В качестве источников сжатого воздуха для эрлифтов используются передвижные компрессорные станции. Параметры эрлифта (сечение труб, глубина их погружения, расход воздуха) подлежат обоснованию или расчету с учетом конкретных условий откачки. При эрлифтной откачке конструкция скважины должна обеспечивать погружение смесителя эрлифта на глубину, в 1,5÷2,5 раза превышающую высоту подъема воды из скважины. Для наблюдения за положением уровня воды в скважине при откачке целесообразно устанавливать специальный пьезометр, нижний конец которого необходимо спускать на 8–10 м ниже смесителя (для исключения влияния пульсации уровня при работе эрлифта).

Штанговые поршневые насосы используются для откачки воды из скважин малой производительности (от 0,5 до 50 $м^3$/ч) при подъеме воды с глубины до 100–150 м.

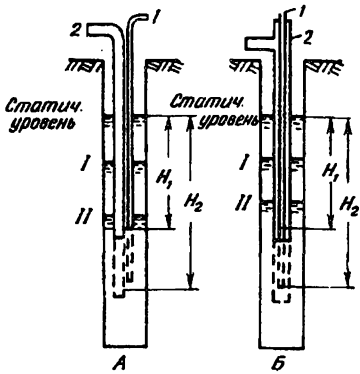


Рис. 3.8. Схемы монтажа эрлифта при откачке с двумя ступенями понижения уровня по схемам «рядом» (А) и «внутри» (Б): I — динамический уровень при погружении труб на глубину H_1; II — то же при погружении на глубину H_2; 1 — воздухопроводные трубы; 2 — водоподъемная колонна

Для откачки чистой воды из скважин целесообразно использовать вертикальные центробежные насосы с погружными и непогружными электродвигателями.

Выпускаемые отечественной промышленностью центробежные насосы с погружными электродвигателями предназначены для установки в скважины диаметром от 101 до 406 мм. Производительность их изменяется от 2–10 м³/ч для насосов малых типоразмеров до 100–375 м³/ч для больших типоразмеров; развиваемый напор — от 25 до 770 м. Напоры насосов, устанавливаемых в скважины диаметром до 203 мм, редко превышают 150–300 м.

Вертикальные центробежные насосы с электродвигателями над скважиной устанавливаются в скважинах диаметром более 203 мм и обеспечивают откачку чистой воды с расходом от 30–70 до 700–800 м³/ч и более при глубине динамического уровня от 25 до 115 м.

Оборудование для опытных нагнетаний. Для опытных нагнетаний применяют унифицированный комплект оборудования, включающий тампон, распределительное устройство, напорные рукава, мерные баки или насосное оборудование (рис. 3.9). Комплект обеспечивает возможность налива или нагнетания воды в изолируемый тампоном интервал при заданных ступенях давления с регистрацией величин водопоглощения по водомеру и давлений по манометрам.

Приборы для замеров уровней температуры и расходов воды. Для замеров уровня воды используются разнообразные переносные и стационарные приборы. Наиболее простыми и употребительными в работе являются переносные приборы — хлопушки и электроуровнемеры. Хлопушки выпускаются с рулетками различной длины, иногда в сочетании с термометром. Они обычно используются для замеров уровня воды глубиной не более 100 м. Точность замеров уровня хлопушками ±1–5 см.

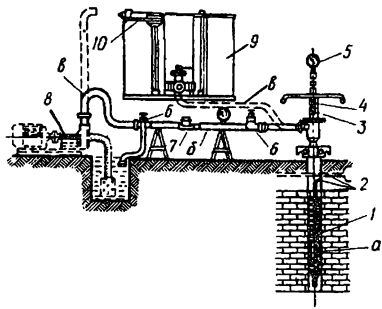


Рис. 3.9. Унифицированный комплект оборудования для опытных нагнетаний (УКН-1М): *а* — тампон; *б* — распределительное устройство; *в* — напорный рукав для нагнетания воды в скважину с помощью насоса или мерных баков; 1 — собственно тампон (резиновые кольца), 2 — колонны упорных труб и натяжных штанг, 3 — головка тампона, 4 — домкрат, 5 — манометр, 6 — вентили, 7 — водомер, 8 — насос, 9 — мерные баки, 10 — регулятор уровня

При использовании электроуровнемеров уровень воды фиксируется по сигналу (загорание лампочки, звонок, отклонение стрелки), возникающему при соприкосновении датчика электрода с поверхностью воды, т. е. при замыкании электрической цепи (рис. 3.10). Серийно выпускаемые электроуровнемеры обеспечивают выполнение замеров уровня воды до глубины 200 м с погрешностью до ±30 см (из-за н точности разметки и низкого качества мерного провода). Использование электроуровнемеров для замеров измерений уровня воды в одних и тех же скважинах позволяет повысить точность измерений до ±1–2 см.

Для регистрации изменений уровня при откачках помимо электроуровнемеров и хлопушек может использоваться пневматический уровнемер ПУР, схема которого показана на рисунке 3.11. Глубина положения уровня воды в скважине x определяется как разность между длиной измерительной трубки l и высотой столба воды в ней h. Высота столба воды h в измерительной трубке регистрируется по давлению нагнетаемого в нее воздуха манометром 3. Для

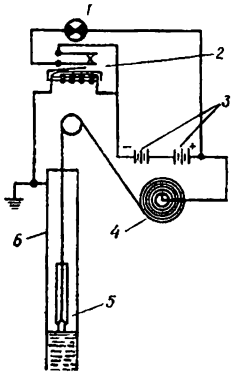


Рис. 3.10. Электрическая схема электроуровнемера ЭВ-1М: 1 — лампочка-индикатор; 2 — реле РСМ-2; 3 — батарейка типа КБСЛ; 4 — катушка с проводом; 5 — электрод; 6 — скважина

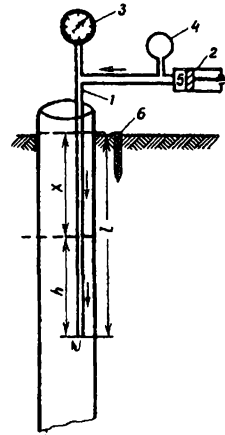


Рис. 3.11. Схема пневматического уровнемера: 1 — трубка; 2 — воздушный насос; 3 — манометр; 4 — баллон; 5 — клапан; 6 — репер

осуществления непрерывной регистрации изменений уровня во времени в систему ПУРа вводятся самопишущие манометры типа МСС-410.

Для измерения и регистрации пластовых давлений в скважинах используются глубинные манометры. Значения пластовых давлений фиксируются в спускаемых в скважины манометрах на диаграммных лентах, приводимых в действие часовым механизмом. Точность измерения давления зависит от типа манометра. Наиболее высокая точность свойственна глубинным дифференциальным манометрам, регистрирующим измеряемое давление не от нуля, а от некоторого начального давления. Для измерения устьевых давлений в скважинах, дающих воду самоизливом, используются различные технические и регистрирующие манометры, обеспечивающие точность замеров до 0,49–0,98 Па (0,05–0,1 кгс/см^2).

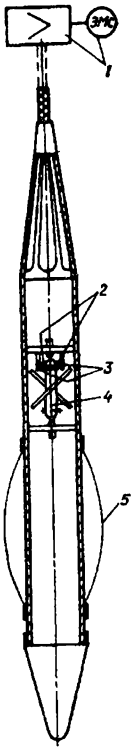
Для измерения температуры подземных вод наиболее широко используются ртутные термометры различных марок, обеспечивающие точность измерений ±0,2–0,5°С, а также более высокоточные ртутные термометры (точность измерений до ±0,01–0,05°С). В комплексе с каротажными станциями для измерений температуры подземных вод широко используются электрические термометры, обеспечивающие возможность измерения температуры воды по всему стволу скважины. Для измерений температуры подземных вод используют также полупроводниковые термометры сопротивлений (терморезисторов), которые достаточно чувствительны и практически безынерционны.

Серийно выпускаются стержневые терморезисторы, которые применяются в комплекте с измерительными мостами сопротивлений.

Некоторые типы глубинных термометров монтируются в комплексе с приборами для замеров уровней и давления подземных вод (с хлопушками, манометрами, пластоиспытателями). Специальные типы глубинных термометров обеспечивают возможность непрерывного измерения и регистрации на специальных бланках изменений температуры во времени.

Для измерения расхода воды при откачках наиболее широко применяется объемный способ, при котором расход определяется по времени заполнения водой мерной емкости (бака, бочки, ведра и т. п.). При расходах воды более 10 л/с целесообразно использование водосливов (трапецеидальных, прямоугольных, треугольных), обеспечивающих определение расхода по высоте уровня проходящей через водослив жидкости. В условиях откачки чистой воды для измерения расхода можно использовать серийно выпускаемые промышленностью водосчетчики (крыльчатые типа ВК и винтовые типа ВВ), которые обеспечивают замеры расхода воды в диапазоне от 0,1 до 1300 $м^3/ч$ с погрешностью ±2–5%. При наличии электроэнергии для автоматического измерения и регистрации расходов воды целесообразно использовать расходомеры постоянного перепада давлений — ротаметры (при дебитах скважин до 63 $м^3/ч$) и электромагнитные расходомеры (в диапазоне от 0 до 400 $м^3/ч$).

Для измерения и регистрации расхода воды по стволу скважины применяются скважинные расходомеры, принцип действия которых основан на измерении скоростей осевого потока воды в стволе скважины. Диаметр датчиков указанных типов расходомеров обеспечивает возможность их применения для замеров расхода с точностью до 5–10% в гидрогеологических скважинах диаметром 80–100 мм, глубиной до 1200 м. Расходомеры типа РЭИ и РГД предназначены для замеров в скважинах диаметром не менее 127 мм. Расходометрические исследования осуществляются с помощью стандартного гео-



физического оборудования. На рисунке 3.12 приведена схема одного из наиболее распространенных типов тахометрических скважинных расходомеров ТСР-34/70Э, имеющего в комплекте два датчика диаметром 34 и 70 мм. Скорость проходящего через расходомер потока определяется с помощью крыльчатки 4, обороты которой фиксируются электромеханическим счетчиком (ЭМС) пульта управления 1.

Приборы и комплекты для опробования водоносных пластов

При бурении глубоких гидрогеологических скважин в устойчивых породах опробование водоносных пластов и зон нередко осуществляется с помощью специальных испытателей и опробователей пластов, опускаемых в скважины на бурильных трубах или кабеле. Изоляция испытуемых интервалов осуществляется тампонами или пакерами, входящими в комплект испытательных инструментов или рассмотренными выше способами.

В простейшем виде испытательный снаряд включает хвостовик-фильтр, резиновый пакер, клапанный узел и бурильные трубы.

Процесс притока воды в бурильные трубы (или специальную камеру) и характер изменения пластового давления под пакером фиксируется с помощью глубинных самопишущих манометров.

В практике опробования глубоких скважин (более 300–500 м) широко применяются комплекты испытательных инструментов, выпускаемые в трех типоразмерах: КИИ-146 (для скважин диаметром от 190 до 295 мм), КИИ-95 (для скважин диаметром от

Рис. 3.12. Скважинный тахометрический расходомер ТСР-34/70Э: 1 — наземный пульт с электромеханическим счетчиком (ЭМС); 2 — фигурный прерыватель электрической схемы; 3— токоподводящие электроды; 4 — ось крыльчатки; 5 — съемная центрирующая рессора

118 до 161 мм) и КИИ-65 (для скважин диаметром от 76 до 112 мм). На базе комплектов КИИ созданы различные модификации.

Позднее был разработан более простой по конструкции и обладающий меньшей жесткостью пакера испытательный снаряд ИСВ, предназначенный для поинтервального опробования гидрогеологических скважин глубиной до 2 000 м (рис. 3.13). После спуска снаряда под весом бурильного инструмента закрывается уравнительный клапан испытателя, и резиновый элемент пакера 3 изолирует испытуемый интервал. Вода из пласта поступает через приемный клапан в пустые бурильные трубы вплоть до поплавкового запорного клапана 5. Глубинные манометры, установленные в фильтре-хвостовике и над приемным клапаном, фиксируют диаграмму изменения давления во времени как в процессе опробования (кривые притока и восстановления), так и в процессе спуска и подъема снаряда. В зависимости от конкретных условий и задач снаряд ИСВ можно применять в различных компоновках (рис. 3.14). В частности, для опробования неглубоких скважин применяется упрощенная компоновка снаряда с проведением откачки из-под пакерной зоны через бурильные трубы (рис. 3.14, *б*). Снаряд ИСВ может также использоваться для испытания колонн и цементных мостов, «оживления» закольматированных горизонтов, отбора проб воды на анализы. Аналогичен ему по устройству и принципу действия испытательный инструмент ИИК-57, обеспечивающий поинтервальное исследование водоносных толщ в скважинах диаметром более 59 мм и глубиной 250–3000 м.

Кроме рассмотренных типов пластоиспытателей в гидрогеологической практике используются снаряд СИП-3 (аналогичен упрощенной модификации ИСВ, рис. 3.14, *в*), опробователь пластов с двумя пакерами ОПТС-8/10 (при-

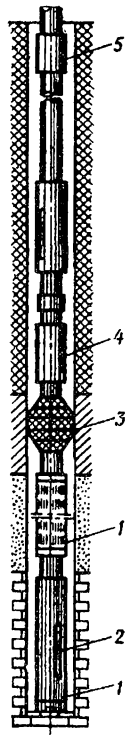


Рис. 3.13. Испытательный снаряд ИСВ: 1 — фильтр-хвостовик; 2 — глубинный манометр; 3 —секционный пакер; 4 — испытатель пластов; 5 — запорный поплавковый клапан

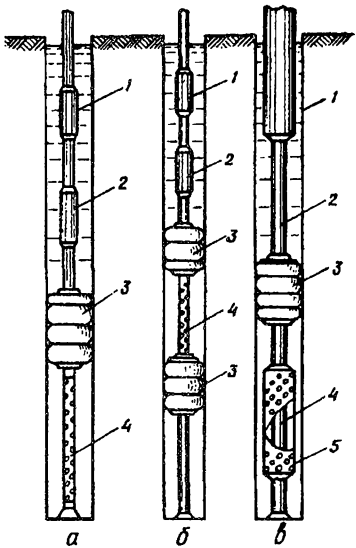


Рис. 3.14. Схемы применения снаряда ИСВ: *а* — с одним пакером; *б* — с двумя пакерами (1 — поплавковый клапан, 2 — узел с манометром, 3 — пакер, 4 — фильтр), *в* — упрощенная компоновка узлов снаряда для откачки из-под пакерной зоны (1 — обсадные трубы, 2 — бурильные трубы, 3 — пакер, 4 — манометр, 5 — хвостовик)

меняется в скважинах диаметром 190–243 мм, глубиной до 4000 м, управление пакерами гидравлическое), а также специальные гидрогеологические опробователи пластов, опускаемые в скважины на кабеле с помощью каротажных станций (опробователи ОПГ-7-10,ОПГ-4-5 и др.).

Пробоотборники. Для отбора проб воды из гидрогеологических скважин помимо специальных опробователей используются пробоотборники различных конструкций, начиная от простейшего (бутылка, с пробкой и грузом на шнуре) и кончая современными, обеспечивающими отбор проб воды и газа из скважин больших глубин.

Отбор проб воды из неглубоких скважин (без газовой составляющей) осуществляется водоносами ГГП-19 и ГГП-20, обеспечивающими глубину спуска до 60 м и объем отбираемых проб 1,5 и 0,6 л соответственно. Для отбора проб воды с газовой составляющей из глубоких скважин (до 1000–1500 м) широко используются глубинные пробоотборники, имеющие большой объем приемных камер (2,5–3 л) и срабатывающие от посыльного груза и от гидравлической воронки. Максимальный диаметр этих приборов

составляет 60 мм. При использовании гидравлической воронки пробоотборники обеспечивают отбор проб воды и газа из вертикальных, наклонных и искривленных скважин с глубины до 1500 м. Например, пробоотборник ПВ (рис. 3.15) позволяет успешно отбирать пробы из скважин, в которых глубина статического уровня достигает 500 м и более от поверхности.

При резких 2–3-кратных подъемах прибора в интервале 3–5 м гидравлическая воронка 1 за счет сопротивления встречному потоку воды передвигается вниз и ударяет по бойку, пробивая мембрану 2 и обеспечивая приток воды в приемную камеру 4. Для отбора проб воды и газа из глубоких скважин применяются нефтяные пробоотборники ПД-3 и ПРИЗ-П (проба до 1 л диаметр прибора 36 мм), обеспечивающие отбор проб из скважин глубиной 3 000 м и более. При гидрогеологических исследованиях находят применение и многие другие технические средства и приборы: пробоотборники и грунтоносы для отбора проб горных пород, приборы для отбора проб газа, геофизическая каротажная аппаратура, перфораторы для прострела обсадных колонн в интервалах опробования, фототелевизионная аппаратура для изучения и обследования стволов скважин, приборы для сбора данных по оценке элементов водного баланса (испарители, влагомеры, лизиметры и др.), различного рода лабораторные приборы и оборудование и т. д.

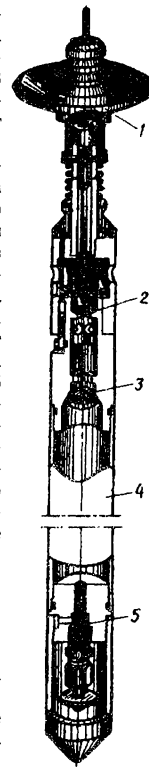


Рис. 3.15. Пробоотборник вакуумный ПВ: 1 — гидравлическая воронка; 2— мембрана; 3 — обратный клапан; 4 — приемная камера; 5— игольчатый вентиль для отбора проб из камеры

3.1.4. Гидрогеологические наблюдения при бурении скважин

Гидрогеологические наблюдения при бурении скважин ведутся непосредственно при проходке скважин, а также при их гидрогеологическом опробовании в процессе бурения. Задачи таких наблюдений — выявление водоносных горизонтов, изучение условий их залегания,

состава, мощности, водообильности и фильтрационных свойств, характера взаимосвязи водоносных горизонтов, химического состава подземных вод и получение другой гидрогеологической информации.

Виды и характер гидрогеологических наблюдений при бурении скважин в значительной мере зависят от способа их бурения. При бурении скважин обычно проводятся гидрогеологические наблюдения за уровнями подземных вод, литологическими особенностями, пористостью и трещиноватостью горных пород, состоянием глинистого раствора и его поглощением, провалами бурового инструмента и выходом керна, температурой вскрываемых вод и газопроявлениями; осуществляется отбор проб воды, газа и образцов пород для анализов и лабораторных исследований; выполняется специальное гидрогеологическое опробование вскрываемых водоносных пластов и горизонтов. Результаты выполняемых гидрогеологических наблюдений отражаются в сменных рапортах, буровых журналах, паспортах скважин и других первичных документах.

Наблюдения за появившимся и установившимся *(статическим)* уровнем воды дают возможность установить глубину залегания и гидравлический характер *(напорность)* вскрываемых водоносных пластов и горизонтов. Уровень воды в скважинах замеряется с помощью гидрогеологических рулеток, уровнемеров и других приборов. При самоизливе воды из скважины уровень ее вычисляется либо по высоте изливающегося фонтана над устьем скважины, либо по величине давления устьевым манометром.

Замеры появившегося и установившегося уровня воды при бурении скважин без промывки легко осуществимы и не вызывают затруднений. При бурении скважин с промывкой вскрытие водоносных горизонтов фиксируется косвенно, на основании наблюдений за выходом и потерями промывочной жидкости, за изменением ее физических свойств (плотности, вязкости, минерализации, температуры), а также за изменением показателей режима бурения в зависимости от типа проходимых пород (скорости углубления снаряда, величины крутящего момента на валу двигателя и затрачиваемой мощности, угловой скорости инструмента и характера его поведения, давления и расхода промывочной жидкости и др.). В частности, вскрытие водопроницаемых пород или водоносного горизонта может быть обнаружено по увеличению или полному поглощению промывочного раствора, по изменению физических свойств раствора (плотности и вязкости) в результате его разбавления водой, по резкому изменению уровня жидкости в скважине, наблюдаемому во время перерывов в бурении. Полное исчезновение промывочного раствора при прекращении бурения обычно свидетельствует о вскрытии необводненных про-

ницаемых пород, а установление его на определенной глубине — о вскрытии водоносного горизонта. Соответствие глубины положения жидкости в скважине статистическому уровню горизонта проверяется кратковременным доливом воды в скважину или ее откачкой из скважины.

Восстановление уровня на прежней глубине свидетельствует о соответствии замеренного уровня статическому.

При современном уровне развития техники можно осуществлять непрерывный контроль как технологических режимов бурения, так и параметров промывочного раствора.

По совпадению нескольких косвенных показателей можно определять моменты вскрытия и глубину залегания водоносных пород, судить о водообильности горизонтов и вскрываемом геологическом разрезе, степени трещиноватости и водопроницаемости пород и т. д.

В процессе бурения скважины уровень воды следует замерять не менее одного-трех раз в смену в зависимости от скорости проходки и количества подъемов бурового снаряда. Буровой снаряд во время замера обязательно должен быть извлечен из скважины. В целях экономии времени гидрогеологические наблюдения приурочивают к подъемам снаряда для извлечения керна и к другим перерывам в бурении.

При бурении скважин с глинистой промывкой чрезвычайно ценными являются наблюдения за поглощением глинистого раствора, изменением его плотности, вязкости, температуры, химического состава. Эти наблюдения дают возможность выполнять сравнительную оценку водопроницаемости пород, фиксировать вскрытие водоносных горизонтов и интервалов необводненных водопроницаемых пород. Например, одновременное изменение плотности, вязкости и минерализации глинистого раствора свидетельствует о вскрытии водоносного горизонта; вертикальные перемещения и толчки бурового инструмента, снижение уровня и большой расход промывочной жидкости — о вскрытии неводоносных или слабоводоносных, но высокопроницаемых отложений.

При обнаружении признаков вскрытия водоносного горизонта (уменьшение вязкости и плотности глинистого раствора, изменение его температуры, резкое изменение уровня жидкости в скважине и т. п.) проходка скважины должна быть приостановлена с целью определения положения уровня вскрытого горизонта и при необходимости его гидрогеологического опробования.

В ряде случаев без остановки процесса бурения можно ориентировочно определить глубину вскрытия водоносного горизонта, его мощность, напор,

температуру и химический состав подземных вод, их газонасыщенность. Более достоверные данные можно получить при бурении с прямой и обратной промывкой на чистой воде. Вскрытие зоны водопротока или поглощения можно определить по изменению расхода выходящей из скважины воды, для чего удобно использовать регистрирующие расходомеры. Параметры промывочной жидкости измеряются такими приборами, как радиоактивные плотномеры, термометры, солемеры, термосолеуровнемеры и др. Наблюдения за литологическим оставом, пористостью и трещиноватостью пород, вскрываемых скважиной, позволяют ориентировочно судить о степени водопроницаемости пород и устанавливать глубину залегания и мощность водоносных горизонтов. Наиболее полную информацию получают при отборе и изучении керна. Для отбора образцов пород из скважин применяются обычные и двойные колонковые трубы и грунтоносы различных конструкций. Частота отбора проб зависит от изменчивости геологического разреза и целевого назначения скважины. Обычно для каждой литологической разности пород отбирают 1–2 образца. После окончания бурения отбор образцов пород возможен боковыми грунтоносами (стреляющими ГРБС, БСГ-1а, ГРС-2, БКДГ, сверлящими СГ-110, СГ-150, пружинными). Отбор образцов при бурении требует перехода на колонковое бурение. Весь керн из скважин следует тщательно отбирать, документировать и укладывать в ящики с указанием интервала отбора и процента выхода керна. Данные о степени выхода керна дают определенные представления о водопроницаемости вскрываемых скважиной горных пород (например, трещиноватые водопроницаемые породы дают малый выход керна, слабопроницаемые и монолитные породы — большой). Сопоставление процентов выхода керна по интервалам бурения с результатами наблюдений за уровнем воды и поглощением промывочного раствора позволяет оценивать водоносность того или иного интервала.

При бурении сплошным забоем большое значение приобретают наблюдения за износом долот, скоростью и режимом бурения. Литологические особенности пород изучаются по шламу, отбираемому при бурении из желобной системы регулярно через каждый метр проходки скважины.

Наблюдения за температурой проводятся как в процессе бурения, так и, главным образом, после окончания бурения скважины, когда восстанавливается нарушенный бурением тепловой режим подземных вод и горных пород. Особую ценность эти наблюдения приобретают при бурении скважин на термальные воды и в области многолетней мерзлоты. Замеры температуры проводятся с помощью термометров замедленного действия, электрических и других приборов.

Эти замеры позволяют устанавливать глубину вскрываемых водоносных горизонтов и мерзлых пород, мощность многолетней мерзлоты, водоносные тектонические нарушения.

При бурении в трещиноватых и карстующихся породах (известняках, мраморах, доломитах, гипсах и др.) необходимо фиксировать провалы бурового инструмента, вызываемые наличием крупных трещин, пустот и полостей, определяющих высокую водопроницаемость проходимого интервала пород. В таких условиях ценную гидрогеологическую информацию дают также наблюдения за поведением уровня воды в скважине, поглощением промывочного раствора и изменением его свойств (плотности, вязкости, температуры, химического состава), а также фототелеметрические исследования.

Наблюдения за изменением химического состава промывочного раствора (обычно фиксируется изменение одного-двух характерных компонентов, например, Na, Cl или SO_4) дают информацию о вскрытии водоносных отложений и ориентировочной их водообильности. Особенно ценными эти наблюдения являются при бурении скважин на минеральные и промышленные воды, характеризующиеся высокой минерализацией и специфичным составом.

Отбор проб воды для изучения химического состава подземных вод вскрываемых водоносных горизонтов осуществляется с помощью желонок, водоносов и пробоотборников после предварительного оттартовывания или откачки воды из скважины до ее полного осветления. Обычно он проводится в период остановки бурения скважин в связи с определением положения статических уровней или в процессе проведения откачек. Объемы отбираемых проб зависят от характера и назначения анализа и чаще составляют 1–2 л.

В процессе бурения скважин необходимо вести наблюдения за газопроявлениями и при возможности отбирать пробы газа при его выделении из выходящей промывочной жидкости. Пробы растворенного в воде газа отбираются из скважин с помощью специальных пробоотборников и дегазаторов одновременно с отбором проб воды.

Для получения более представительных данных о вскрываемых водоносных горизонтах и, в частности, об их водообильности и фильтрационных свойствах проводится специальное гидрогеологическое опробование. В процессе бурения скважин и вскрытия водоносных горизонтов предварительное опробование осуществляется путем желонирования, проведения кратковременных откачек или наливов (экспресс-опробование), испытания пластов специальными опробователями и испытательными комплектами, а также методом опережающего опробования с использованием вводимого в скважину специального фильтра-опробователя. Гидрогеологические наблюдения в процессе

опробования вскрываемых горизонтов заключаются в замерах и регистрации дебитов и в измерениях уровней, как в процессе откачек, так и после их прекращения (восстановление уровня). Результаты наблюдений фиксируются в буровом и геологическом журналах, в журнале откачек, в актах на проведение исследований в скважине, на гидрогеологических колонках и т. д. Данные опробования используются для сравнительной оценки фильтрационных свойств и водообильности вскрываемых горизонтов и пластов, выбора интервалов для установки фильтров и детального их гидрогеологического изучения и решения других задач. Более детально методы гидрогеологического опробования (опытно-фильтрационные работы) рассмотрены в подглаве 3.2.

Комплексное проведение различных видов наблюдений и исследований (в том числе и геофизических) при бурении скважин обеспечивает своевременное и надежное выявление водоносных пластов и горизонтов и их последующее гидрогеологическое изучение и опробование.

3.1.5. Гидрогеологические наблюдения при проведении горных работ

Гидрогеологические наблюдения проводятся не только при бурении скважин, но и при проходке других разведочных и эксплуатационных горных выработок (шурфов, дудок, шахтных стволов, штолен и т. п.). Задачи таких наблюдений могут быть разными, но всегда необходимо стремиться получить ценную дополнительную геолого-гидрогеологическую информацию об объектах изучения и использовать ее для эффективного решения поставленных гидрогеологических задач. Гидрогеологические наблюдения в горных выработках могут проводиться в процессе поисково-разведочных гидрогеологических работ, при специализированных съемках, поисках, разведке и разработке месторождений различных полезных ископаемых и выполнении других заданий.

Если в районе проведения гидрогеологических работ имеются действующие или старые рудники, то и их выработки подлежат гидрогеологическому обследованию и документации. При этом необходимо выявить как путем непосредственного обследования, так и путем сбора фондовых данных следующие сведения: географическое положение описываемого объекта; когда, кем и для каких целей пройдены горные выработки; основные особенности геологии участка; описание горных выработок (их глубина, сечение, крепление, план расположения вертикальных, горизонтальных и наклонных выработок); литолого-стратиграфический разрез по стволу и квершлагам; состояние и устойчивость пород в выработках; описание вскрытых водоносных зон и горизонтов (размеры и характер водопроявлений, дебит, физические свойства

и химический состав воды, режим и др.); изменение характера и степени трещиноватости пород и их обводненности по мере углубления выработок; наличие прорывов воды в горные выработки (время, глубина проявления, вмещающие породы, причина возникновения, размер наблюдавшегося притока); суммарный приток в горные выработки и его изменение по временам года и по годам, приток воды на единицу площади или длины горных выработок; влияние горных выработок и дренажных работ на режим и загрязнение водоносных горизонтов, использующихся для водоснабжения; применяемые средства осушения месторождения (поглощающие скважины, забивные фильтры, сквозные фильтры и т. д.), их описание и режим работы; существующие ограждения выработок от воды и их эффективность (перемычки, водопроницаемая крепь и др.); использование шахтных (рудничных) вод в практических целях.

В подземных горных выработках фиксируются и описываются все водопроявления, проводятся наблюдения за притоком, температурой и химическим составом воды, изучаются литологические особенности вскрытых пород, их водно-физические свойства и устойчивость в кровле, стенках и подошве выработок. Преимущества осуществления наблюдений в горных выработках большого сечения заключаются в том, что породы и водопроявления доступны в них непосредственному осмотру и визуальному изучению. При наблюдениях как в вертикальных, так и в горизонтальных выработках целесообразны фотографирование и зарисовки наблюдаемых объектов и явлений.

Основное внимание при документировании горноразведочных выработок уделяется изучению литологических особенностей вскрытых пород, их структуры, крепости, степени выветрелости, трещиноватости, плотности (для песков), глинистости и консистенции (для связных пород), влажности, водопроявлений и физико-геологических процессов.

Следует обращать внимание на состояние и устойчивость горных пород в почве, кровле и стенках изучаемых горных выработок (штолен, штреков, шурфов и др.); тщательно фиксировать характер и особенности наблюдаемых физико-геологических явлений и процессов (пучение, прорывы плывунов, прогибы, вывалы, просадки, деформации и др.).

При документировании горных работ ведутся тщательные наблюдения за всеми видами водопроявлений; определяются появившиеся и установившиеся уровни вскрываемых водоносных горизонтов. В процессе проходки выработок с водоотливом и при создании водотоков в некоторых видах выработок (например, в канавах, заданных на склоне рельефа, или штольнях с уклоном в сторону устья) определяются величины водопритока и водоотлива, изучается режим подземных вод.

Глава 3.2. ПОЛЕВЫЕ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Одной из основных задач исследований при изучении месторождений подземных вод и решении разнообразных гидрогеологических задач является определение гидрогеологических параметров водоносных толщ и горных пород зоны аэрации. Без установления этих параметров обычно невозможны количественные оценки и различного рода инженерные расчеты и прогнозы, связанные с выявлением подземных вод, их количественным и качественным изучением, народнохозяйственным освоением или регулированием.

В настоящее время для определения расчетных гидрогеологических параметров, характеризующих главным образом фильтрационные свойства и водообильность горных пород, применяются различные методы, целесообразность и эффективность использования которых зависят от стадии и технических условий проведения исследований, характера и специфики решаемых задач, природных условий изучаемого гидрогеологического объекта и других факторов. К числу таких методов относят:

1) откачки;
2) наливы и нагнетания в скважины;
3) наливы в шурфы;
4) экспресс-методы;
5) определение параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод;
6) лабораторные методы;
7) геофизические методы;
8) моделирование.

Перечисленные методы характеризуются различной степенью надежности определения фильтрационных свойств и спецификой их проведения. Первые четыре метода могут быть отнесены к группе полевых опытно-фильтрационных и являются преобладающими в практике гидрогеологических исследований как обеспечивающие эффективное и более достоверное определение расчетных гидрогеологических параметров.

Определение параметров по данным стационарных наблюдений представляется одним из наиболее надежных методов, особенно в районах действующих водозаборных или дренажных сооружений, а также на прибрежных участках водотоков и водоемов, где возмущения от действия указанных объектов проявляются наиболее ощутимо и данные о поведении уровней подземных вод являются надежной основой для количественной оценки различных гидрогеологических параметров. Применение этого метода требует нали-

чия точек режимной сети (скважин, створов, постов) и организации соответствующих наблюдений за режимом подземных вод (см. гл. IV).

Лабораторные методы определения фильтрационных свойств применяются для массовых ориентировочных предварительных оценок на первоначальных этапах изучения горных пород (главным образом глинистых и песчаных) и основаны на проведении опытной фильтрации воды через специально отбираемые образцы горных пород с помощью различных приборов. Сюда же следует отнести и методы определения фильтрационных свойств по различного рода эмпирическим зависимостям, учитывающим корреляционные связи этих свойств с различными показателями горных пород (гранулометрическим составом, пористостью и др.), определяемыми в лабораторных условиях.

Геофизические методы дают результаты, пригодные для предварительных ориентировочных оценок фильтрационных свойств и гидрогеологического расчленения изучаемого разреза. Среди этих методов следует выделить: 1) электролитический метод (резистивиметрия), используемый в трещиноватых породах, а также в рыхлых отложениях, не содержащих значительных количеств глинистых и пылеватых частиц; 2) расходометрию, применяющуюся в незакольматированных глинистым раствором стволах скважин; 3) термометрию, проводимую в основном для изучения слабопроницаемых разделяющих водоносные горизонты пород; 4) акустические методы каротажа, применяющиеся в трещиноватых породах; 5) радиоактивный каротаж, использующийся для выделения водоносных горизонтов и определения пористости горных пород.

Моделирование дает возможность определять и уточнять гидрогеологические параметры на основе решения комплекса обратных задач, используя результаты режимных наблюдений или наблюдений за изменением уровней и расходов в процессе проведения опытно-фильтрационных работ. Оно обеспечивает достаточно высокую надежность определения параметров и целесообразно в сложных гидрогеологических условиях при отсутствии возможности достоверного определения фильтрационных свойств другими методами.

Для обеспечения требуемой надежности определения гидрогеологических параметров и повышения экономической эффективности гидрогеологических исследований целесообразно комплексировать различные методы определения фильтрационных свойств с учетом конкретных гидрогеологических условий изучаемого объекта, характера и требований решаемых задач, технических возможностей и экономической эффективности отдельных используемых методов, последовательности их проведения и других факторов.

3.2.1. Основные виды полевых опытно-фильтрационных работ, их задачи и условия применения

К полевым опытно-фильтрационным работам относятся полевые гидродинамические опыты по определению фильтрационных свойств горных пород. Это различного вида откачки, наливы и нагнетания в скважины, наливы в шурфы, экспресс-наливы и экспресс-откачки, опережающее опробование водоносных горизонтов, опробование с помощью испытателей пластов и некоторые другие методы. В учебнике к специальным видам опытно-фильтрационных работ отнесены и традиционно считавшиеся геофизическими методами резистивиметрия и расходометрия, являющиеся в своей основе гидродинамическими (замеры и анализ профиля расхода потока в скважине), но используемые с широким применением геофизической аппаратуры.

Все указанные методы обеспечивают определение с той или иной степенью достоверности различных гидрогеологических параметров изучаемых горных пород на основе использования получаемой в процессе опытной фильтрации информации о значениях напоров, расходов, скоростей движения воды и других показателей. Достоверность определения параметров определяется степенью соответствия выбранной для обработки опытных данных фильтрационной схемы реальным условиям фильтрации в процессе опыта.

В результате проведения и обработки опытно-фильтрационных работ в зависимости от поставленной задачи определяются следующие основные гидрогеологические параметры: кривая дебита $Q = f(S_c)$, коэффициент фильтрации K (или значение водопроводимости $T = Km$ или $T = Kh_{cp}$), радиус влияния R, коэффициент пьезопроводности a (или уровнепроводности для грунтовых вод), водоотдача пород в безнапорных потоках μ и показатель упругой водоотдачи μ^*, показатель несовершенства скважин ζ_0, параметр перетекания B, показатель, характеризующий закольматированность и несовершенство вреза русловых отложений, скорость движения подземных вод.

Для обработки результатов опытно-фильтрационных работ в настоящее время широко используются формулы неустановившейся и установившейся фильтрации с акцентом на применение решений неустановившегося движения подземных вод, что обеспечивает повышение эффективности выполняемых работ за счет сокращения их продолжительности и более полного определения параметров потоков подземных вод (в частности, параметров неустановившейся фильтрации: уровнепроводности, пьезопроводности, упругой водоотдачи и др.).

Основной и наиболее распространенный вид опытно-фильтрационных работ — откачки, которым отдается предпочтение почти всегда при опробова-

ниях водоносных пород, особенно при проведении изысканий для целей водоснабжения, осушения и дренажа.

На участках с глубоким залеганием подземных вод, а также в условиях, неблагоприятных для проведения откачек (слабая водообильность и водоотдача пород), при необходимости определения гидрогеологических параметров не насыщенных водой пород применяются наливы и нагнетания в скважины, опытные наливы в шурфы. Опытные нагнетания целесообразны при оценке фильтрационных свойств и удельного водопоглощения трещиноватых скальных и полускальных водоносных пород, а опытные наливы в скважины главным образом в неводонасыщенных рыхлых и трещиноватых породах зоны выветривания. Опытные наливы в шурфы используются для изучения водопроницаемости необводненных связных и рыхлых горных пород в естественном залегании.

Экспресс-методы применяются для ориентировочной (сравнительной) оценки фильтрационных свойств водоносных пород; на первоначальных стадиях гидрогеологических исследований, для выявления объектов и обоснования объемов дальнейших гидрогеологических исследований, характеристики водопроницаемости пород в разрезе и решения некоторых других задач. В настоящее время экспресс-опробование водоносных горизонтов осуществляется с помощью опережающего опробования в процессе бурения скважин, применения специальных испытателей и опробователей пластов, экспресс-откачек и экспресс-наливов, расходометрии, термометрии и других методов.

3.2.2. Методы определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек

Откачки подземных вод из скважин — один из основных, наиболее надежных, но вместе с тем и дорогостоящих видов фильтрационного опробования водоносных горизонтов (затраты на откачки нередко достигают 35–60% от общих затрат на разведку подземных вод). Поэтому правильное обоснование их видов, объемов и методики проведения во многом определяет эффективность и успех решения поставленных задач.

Виды откачек и их назначение. В зависимости от назначения все откачки, которые проводятся при поисках и разведке различных типов месторождений подземных вод, подразделяются на три вида: пробные, опытные и опытно-эксплуатационные. Они отличаются главным образом продолжительностью опытных работ и конструкцией опытного куста. В связи с этим для проведения полевых опытных работ необходимо четко установить задачи, для решения которых проектируются опытно-фильтрационные исследования.

Наиболее массовым видом откачек при поисках и разведке подземных вод являются пробные, которые проводятся практически на всех скважинах, пробуренных в процессе гидрогеологических исследований (поисковых, разведочных, наблюдательных). Они выполняются для предварительной оценки фильтрационных свойств и водообильности пород, качества подземных вод и сравнительной характеристики различных участков и зон водоносных горизонтов. Пробные откачки (выпуски) проводятся кратковременно (6–48 ч), как правило, на одну ступень понижения уровня.

Основной вид фильтрационных работ на стадиях предварительной и детальной разведки — опытные откачки. Они проводятся для решения следующих вопросов:

1) определения основных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов (дебита, величины понижения уровня, коэффициентов фильтрации, водопроводимости, пьезо- и уровнепроводности, водоотдачи, перетекания, приведенного радиуса влияния, суммарного сопротивления русловых отложений и др.);
2) изучения граничных условий водоносных горизонтов в плане и разрезе (взаимосвязи подземных и поверхностных вод, взаимодействия смежных горизонтов и т. д.);
3) установления оптимальной производительности эксплуатационных скважин и зависимости между дебитом скважины и понижением уровня в ней;
4) определения величин срезок уровня в пределах участка расположения водозабора при совместной работе нескольких взаимодействующих эксплуатационных скважин.

Опытные откачки подразделяются на кустовые и одиночные. Одиночные опытные откачки проводятся для установления зависимости дебита от понижения $Q = f(s)$ и в отличие от пробных выполняются на две-три ступени понижения уровня. Кустовые откачки — основной вид опытных работ, если задачей откачек является определение гидрогеологических параметров, изучение граничных условий, опытное определение величин срезок уровня.

Кустовые опытные откачки позволяют более надежно и полно изучить параметры потока в зоне влияния откачки, исключить влияние фильтра и призабойной зоны центральной скважины на точность определения параметров и, наконец, определить непосредственно показатель обобщенного сопротивления скважины (ζ_0), что имеет большое значение для прогноза условий работы проектируемых водозаборных и дренажных сооружений.

Разновидностью кустовых откачек являются опытные групповые откачки, которые проводятся для изучения условий взаимосвязи водоносных горизонтов и определения основных гидрогеологических параметров на тех участках, где отбор воды из одиночной скважины не может обеспечить необходимой точности расчетов в связи с незначительными абсолютными величинами понижений уровня.

Опытно-эксплуатационные откачки из одной или нескольких скважин проводятся только на стадии детальной разведки в сложных гидрогеологических и гидрогеохимических условиях, которые не могут быть отображены в виде расчетной схемы. Цель опытно-эксплуатационных откачек — установление закономерностей изменения уровней подземных вод или их качества при заданном водоотборе. Проводятся они довольно длительное время (1–3 месяца и более) при дебитах скважин, близких к проектному водоотбору, и их данные принимаются за основу при прогнозах условий работы водозаборных и дренажных сооружений.

Методы обработки результатов откачек. Определение гидрогеологических параметров осуществляется, как уже отмечалось, на основе обработки данных о поведении уровней и дебитов в процессе опытно-фильтрационных работ. При этом методы обработки опытных данных основаны на использовании аналитических решений в различных их модификациях в соответствии с характером и полнотой полученной информации. Достоверность определения параметров определяется степенью соответствия выбранной для обработки опытных данных фильтрационной схемы реальным условиям фильтрации в процессе опыта. Сложность и разнообразие гидрогеологических условий, сложный характер формирования режима подземных вод при опытных откачках, когда одинаковые закономерности изменения уровней и расходов могут быть вызваны влиянием самых различных факторов (как естественных, так и искусственных), существенно затрудняют выбор фильтрационной схемы и требуют обязательного всестороннего анализа условий проведения опыта и обоснованной интерпретации данных опытно-фильтрационных работ. Конечной целью этого обязательного этапа работ является обоснованный выбор расчетной интерпретационной схемы, учитывающей с оптимальной полнотой и надежностью природные и технические условия проведения опыта.

При проведении опытных откачек с целью определения параметров особое внимание необходимо уделять вопросам установления источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, оценке влияния особенностей строения водовмещающих пород и границ области фильтрации и различного рода других специфических факторов на закономерности и осо-

бенности поведения уровней и дебитов скважин. Это обеспечивает обоснованный выбор фильтрационной схемы, достоверное определение расчетных гидрогеологических параметров и надежность выполняемых впоследствии инженерных оценок и прогнозов.

Режим движения подземных вод при опытных откачках определяется гидрогеологическими условиями (строением водовмещающей толщи и граничными условиями ее в плане и в разрезе), естественным режимом подземных вод и техническими условиями проведения опыта. В первоначальный период откачки движение подземных вод имеет резко выраженный неустановившийся характер. Однако уже через сравнительно небольшой период времени вокруг опытной скважины начинает развиваться зона с квазиустановившимся характером режима (кривые депрессии в этой зоне перемещаются параллельно самим себе). По мере дальнейшего развития депрессионной воронки на ее формирование могут оказать влияние перетекание из смежных в разрезе горизонтов, дополнительные источники питания, границы пласта в плане и другие факторы. В зависимости от характера действия указанных факторов режим движения подземных вод может стабилизироваться (при открытых границах и дополнительном питании) или оставаться неустановившимся (при закрытых границах и отсутствии дополнительных источников питания). Соответственно этому и определение параметров по данным откачки следует проводить с учетом особенностей того или иного режима фильтрации и характера действующих в процессе откачки факторов.

В условиях стабилизации режима движения подземных вод в процессе опыта определение расчетных гидрогеологических параметров можно проводить как по формулам неустановившейся и квазиустановившейся фильтрации, используя первый период откачки, так и по формулам установившейся фильтрации на основе наблюдений в период стабилизации движения подземных вод.

Современные методы определения гидрогеологических параметров по данным откачек базируются в основном на уравнениях неустановившегося движения (в частных случаях — на формулах квазистационарной и стационарной фильтрации).

В зависимости от характера используемой опытной информации методы определения параметров условно делятся на две группы.

Методы первой группы используют данные того периода откачек, при котором закономерности изменения уровня в процессе опыта определяются только фильтрационными и емкостными свойствами опробуемого горизонта (влияние границ пласта в плане и в разрезе еще не сказывается).

Методы второй группы используют информацию того периода опыта, когда закономерности изменения уровней подземных вод во времени и пространстве определяются не только фильтрационными и емкостными свойствами горизонта, но и условиями на его границах. В соответствии с этим в первом случае для определения параметров используются уравнения, описывающие закономерности движения подземных вод к скважинам в неограниченных изолированных водоносных горизонтах, во втором — решения, учитывающие закономерности притока воды к скважинам в условиях влияния границ (ограниченные пласты и схемы с перетеканием). Методы второй группы наряду с основными гидрогеологическими параметрами горизонтов (K, T, μ, μ_*, a) позволяют определять такие параметры, как коэффициент перетекания, несовершенство вреза русла водоема и др., однако они более трудоемки для интерпретации, в связи с чем там, где это, возможно, следует отдавать предпочтение методам первой группы. К использованию схем ограниченных пластов следует прибегать лишь при необходимости определения параметров перетекания и взаимосвязи подземных вод с поверхностными.

При определении гидрогеологических параметров используют либо данные о понижениях уровня в различных точках пласта в какой-то момент времени, либо данные об изменении уровня подземных вод в какой-либо точке пласта во времени. При этом достоверность определения параметров повышается с увеличением количества точек наблюдений за изменением уровня.

В зависимости от характера используемой гидрогеологической информации и приемов ее обработки на практике для определения параметров используют различные методы: подбора, характерных точек, эталонных кривых, прослеживания уровня во времени и по площади (графоаналитические методы), аналитические и др. С позиций достоверности определения параметров наиболее предпочтительными являются графоаналитические методы прослеживания уровня и метод эталонных кривых; менее достоверными и информативными — методы, основанные на использовании ограниченной гидрогеологической информации (методы подбора, характерных точек, аналитические и др.).

Ниже рассмотрены различные методы и способы обработки результатов откачек при опробовании главным образом пресных и слабоминерализованных вод, когда не требуется учитывать влияние таких специфических факторов, как изменение температуры, проявление газовой составляющей, гидравлических потерь на преодоление сопротивлений по стволу скважины и некоторых других. Специфика оценки и учета влияния указанных факторов при проведении опытно-фильтрационных работ и обработка их результатов освещены в специальной литературе.

На практике, учитывая незначительную продолжительность откачек, для определения параметров используется схема откачки из артезианских или грунтовых совершенных (или несовершенных) скважин, расположенных в условно однородных изолированных в разрезе и неограниченных в плане пластах, когда зависимость между понижением уровня S и временем t описывается соответственно уравнениями Тейса:

(3.1)

где Q — постоянный во времени дебит скважины, T — водопроводимость; $W(u)$ — функция скважины, соответствующая интегральному экспоненциалу $Ei(-u)$; u — аргумент функции скважины, равный $r^2/4at$ (r — расстояние от возмущающей скважины до точки, в которой обеспечивается понижение уровня S); H_e — естественная мощность потока грунтовых вод.

В условиях квазиустановившейся фильтрации формула Тейса видоизменяется, так как при значении аргумента $u = r^2/4at < 0{,}09 \div 0{,}15$ функция скважины $W(u)$ с точностью 5–10% может быть представлена в виде ее логарифмического приближения $W(u) \approx \ln(2{,}25at/r^2)$, и выражения (3.1) приобретают вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} = \ln\frac{2{,}25at}{r^2} = \frac{Q}{2\pi T}\ln\frac{R_t}{r} \text{ и } (2H_e - S)S = \frac{Q}{2\pi K}\ln\frac{2{,}25at}{r^2} = \frac{Q}{\pi K}\ln\frac{R_t}{r}. \quad (3.2)$$

Уравнения (3.2) аналогичны формулам Дюпюи для стационарной фильтрации (в них $R_t = \sqrt{1{,}5at}$ — приведенный радиус влияния). Это позволяет использовать традиционные приемы теории установившейся фильтрации для определения параметров в условиях квазиустановившегося режима движения подземных вод.

Методы определения параметров по результатам откачек из однородных изолированных в разрезе неограниченных пластов. Приемы обработки результатов откачки рассмотрены на примере наиболее распространенной схемы — напорного изолированного в разрезе условно однородного пласта. Отметим, что они в равной мере справедливы и при откачках из безнапорных пластов. Если величина понижения уровня в грунтовых водах не превышает 15–20% первоначальной их мощности, то можно с достаточной для целей практики точностью вести обработку результатов откачек как для напорных вод. В противном случае следует использовать соответствующие зависимости для грунтового потока.

В условиях кратковременных откачек и при использовании наблюдений первого периода длительных откачек определение расчетных гидрогеологических параметров проводится на основе методов подбора, эталонной кривой и характерных точек.

Метод подбора основан на сопоставлении величин понижения уровня в одной и той же точке потока (в скважине) на два момента времени либо в двух разных точках потока на один момент времени и подборе значений параметров, удовлетворяющих рассматриваемое соотношение понижений уровня.

Если, например, при откачке из напорного водоносного горизонта с постоянным дебитом (Q = const) в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии r от центральной, в моменты времени t_1 и t_2 зафиксированы понижения уровня S_1 и S_2, то на основе уравнения (3.1) можно записать следующее соотношение:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{W\left(r^2/4at_2\right)}{W\left(r^2/4at_1\right)}. \qquad (3.3)$$

В выражении (3.3) известны все величины, кроме значения пьезопроводности a, которое и подлежит определению методом подбора. Для этого обычно задаются несколькими значениями a и, получив соответствующие величины S_2/S_1, строят вспомогательный график $S_2/S_1 = f(a)$, по которому, исходя из соотношения наблюдаемых понижений S_2/S_1, находят расчетное значение пьезопроводности a.

При найденном значении пьезопроводности коэффициент водопроводимости определяется из выражения для S_1 или S_2

$$T = \frac{Q}{4\pi S_1} W(u_1) \text{ или } T = \frac{Q}{4\pi S_2} W(u_2), \qquad (3.4)$$

где $u_1 = r^2/4at_1$ $u_2 = r^2/4at_2$.

Метод подбора нельзя признать надежным, так как определение параметров осуществляется по двум замерам. Для более обоснованного определения параметров этим методом следует проводить повторные определения по новым замерам, а выбор замеров для сопоставлений контролировать составлением графика $S = f(t)$.

Метод эталонной кривой заключается в составлении графика зависимости $\lg Sf[\lg(t/r^2)]$ по данным опыта и последующем совмещении его с эталон-

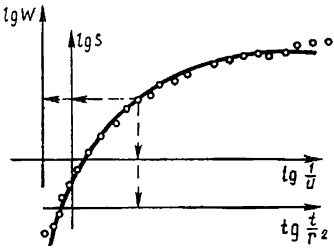


Рис. 3.16. Схема к определению параметров методом эталонной кривой

ной кривой — графиком зависимости $\lg W$ от $\lg(l/u)$. Совмещение графиков, построенных в одинаковом масштабе, проводится до удовлетворительного их совпадения по большинству точек при условии сохранения параллельности координатных осей (рис. 3.16). Снимая далее координаты любой точки совмещенного графика $\lg S$, $\lg W$, $\lg(t/r^2)$, $lg(l/u)$, определяют водопроводимость T и пьезопроводность соответственно из уравнений:

$$\lg\frac{Q}{4\pi T} = \lg S - \lg W \text{ и } \lg 4a = \lg\left(\frac{1}{u}\right) - \lg\left(\frac{1}{r^2}\right). \qquad (3.4)$$

Для удобства совмещения опытной и эталонной кривых последняя строится на кальке; для ее построения можно воспользоваться следующими данными:

$\lg(l/u)$ −0,3 −0,15 0,0 0,15 0,3 0,5 0,7 1 1,3;

$\lg W$ −1,31 −0,943 −0,66 −0,433 −0,254 −0,062 0,086 0126 0,393.

Необходимо отметить, что построенные в системе координат $\lg S$–$\lg(t/r^2)$ графики для разных наблюдательных скважин должны совпадать и по степени их совпадения можно судить о соответствии исходного уравнения (3.1) реальным условиям фильтрации при откачке, а также о степени однородности и изолированности опробуемого горизонта.

Метод характерных точек основан на использовании для определения параметров характерных точек кривой изменения уровня в наблюдательных скважинах (точка начала реагирования, точка перегиба, точка касания). Существенного распространения в практике опытно-фильтрационных исследований метод не получил.

В условиях квазиустановившейся фильтрации, время наступления которой t_k при точности замены экспоненциальной функции логарифмической до 5% определяется критерием $t_k \geq 2{,}5(r^2/a)$, возможно использование графоана-

литических и аналитических методов, основанных на логарифмической зависимости понижения уровня от времени, т. е. на исходных формулах (3.2).

Наиболее широким распространением в практике гидрогеологических расчетов пользуются *графоаналитические методы* определения параметров, основанные на возможности представления исходных уравнений движения воды к скважине в виде уравнения прямой линии. Например, исходное уравнение (3.2), описывающее неустановившееся движение воды к совершенной артезианской скважине, работающей в неограниченном пласте, может быть представлено в виде следующих трех формул:

$$S = \frac{0,183Q}{T}\left(\lg\frac{2,25a}{r^2} + \lg t\right); \tag{3.6}$$

$$S = \frac{0,183Q}{T}\left(\lg 2,25a + \lg\frac{t}{r^2}\right); \tag{3.7}$$

$$S = \frac{0,366Q}{T}\left(\frac{1}{2}\lg 2,25at + \lg r\right). \tag{3.8}$$

Все три приведенные формы записи одного и того же уравнения (3.2) представляют собой уравнения прямой линии в разных системах координат: (3.6) — в координатах S–$\lg t$; (3.7) — в координатах S–$\lg(t/r^2)$ и, наконец, (3.8) — в координатах S–$\lg r$ (рис. 3.17). Угловой коэффициент каждой из прямых, описываемых уравнениями (3.6–3.8), определяется членом уравнения, стоящим перед скобкой, а величина, отсекаемая прямыми на оси абсцисс (по линии нулевого понижения уровня), — первыми членами уравнения в скобках. В аналогичных трех формах может быть соответственно представлено

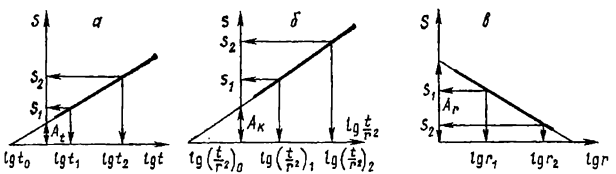


Рис. 3.17. Графики зависимости $S = f(\lg t) = f[\lg(t/r^2)]$, $S = f(\lg r)$

и исходное уравнение, характеризующее движение подземных вод к совершенной грунтовой скважине, работающей в неограниченном пласте.

В соответствии с тремя приведенными формами исходных уравнений можно использовать три способа графоаналитической обработки данных опытных откачек, получивших на практике наименование способов временного, комбинированного и площадного прослеживания.

Обработка и представление опытных данных в виде прямой, описываемой уравнением (3.6), широко используется как при одиночных, так и при кустовых откачках. Для каждой фиксированной точки (скважины) может быть построен график $S = f(\lg t)$, позволяющий проводить определение расчетных параметров (рис. 3.18, А). Обработка и представление опытных данных в виде графиков, описываемых соответственно уравнениями (3.7) и (3.8), возможны при наличии достаточного количества наблюдательных скважин (не менее трех-четырех).

$$S = f\left[\lg\left(t/r^2\right)\right] \text{ и } S = f(\lg r).$$

Значения расчетных параметров — коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности — определяются по угловым коэффициентам C и начальным ординатам A, снимаемым с соответствующих прямолинейных графиков прослеживания. Формулы для расчета параметров по всем трем видам прослеживания приведены в таблице 3.2. Угловые коэффициенты графиков прослеживания определяются по двум точкам прямой соответственно по отношениям:

$C = (S_2 - S_1)/(\lg t_2 - \lg t_1)$ — для временного;

$C = (S_2 - S_1)/[(\lg(t/r^2)_2 - \lg(t/r^2)_1]$ — для комбинированного;

и $C = (S_2 - S_1)/(\lg r_2 - \lg r_1)$ — для площадного прослеживания.

Таблица 3.2

Способ обработки, график	Расчетные формулы для определения параметров	
	водопроводимости	пьезопроводности
Временное прослеживание $S = f(\lg t)$	$T = 0{,}183Q/C_t$	$\lg a = 21\text{gr} - 0{,}35 + A_t/C_t$
Комбинированное прослеживание $S = f(\lg t/r^2)$	$T = 0{,}183Q/C_K$	$\lg a = A_K/C_K - 0{,}35$
Площадное прослеживание $S = f(\lg r)$	$T = 0{,}366Q/C_r$	$\lg a = 2A_r/C_r - 0{,}35 - \lg t$

Для удобства угловые коэффициенты можно вычислять как разность понижений, принимая: $\lg t_2 - \lg t_1 = 1$, $\lg(t/r^2)_2 - \lg(t/r^2)_1 = 1$, $\lg r_2 - \lg r_1 = 1$.

Определение параметров, и в частности коэффициента пьезопроводности, при описываемых способах прослеживания возможно также по величине отрезка, отсекаемого прямолинейными графиками на оси абсцисс (по линии нулевого понижения). Эти отрезки (соответственно $\lg t_0$, $\lg(t/r^2)_0$, $\lg r_0$, рис. 3.17), как уже отмечалось, определяются первыми членами уравнений (3.6–3.8), стоящими в скобках. В соответствии с этим при известных величинах указанных отрезков (снимаются с графиков) для определения коэффициента пьезопроводности могут быть использованы соответственно следующие формулы:

$$a = r^2/2{,}25t_0;\ a = 0{,}445\left(r^2/t\right)_0 \text{ и } a = r_0^2/2{,}25t. \tag{3.9}$$

Определяемые таким образом значения пьезопроводности должны совпадать со значениями пьезопроводности, рассчитываемыми по формулам таблицы 3.2. При известных значениях водопроводимости и пьезопроводности может быть определена величина упругой водоотдачи $\mu^* = T/a$. Ниже для примера дается более обстоятельное описание одного из графоаналитических методов определения параметров, который в практике гидрогеологических исследований называют способом временного прослеживания.

$$\frac{0{,}183Q}{T}\lg\frac{2{,}25a}{r^2} = A_t \text{ и } \frac{0{,}183Q}{T}C_1. \tag{3.10}$$

Если опытная скважина несовершенна, то при обработке данных откачек графоаналитическим методом методика определения параметров остается прежней. Несколько видоизменяется лишь расчетная формула для определения коэффициента пьезопроводности, которая принимает следующий вид:

$$\lg a = 2\lg - 0{,}35 + \frac{A_t}{C_t} - 0{,}434\zeta, \tag{3.11}$$

где ζ — величина гидравлического сопротивления, учитывающая несовершенство скважины (определяется по графикам или таблицам в зависимости от l_0/m и m/r). Для наблюдательных скважин величина ζ незначительна и ею можно пренебречь. Обработка результатов опытных откачек из безнапорных водоносных горизонтов проводится так же, как и для напорных. Если величина понижения уровня S составляет не более 20% от первоначальной мощности водоносного горизонта H_e, то для безнапорных вод можно с допустимой для практики погрешностью определять расчетные параметры как для напор-

ных вод, пользуясь графиком $S = f(\lg t)$. Если это условие не соблюдается, то для определения параметров необходимо построить график $(2H_e - S)S = f(\lg t)$, также выражающийся прямой линией, уравнение которой имеет вид:

$$(2H_e - S)S = \frac{0,366Q}{K}\lg\frac{2,25a}{r^2} + \frac{0,366Q}{K}\lg t. \qquad (3.12)$$

Снимая с графика значения коэффициентов A_t (отрезок, отсекаемый на оси ординат) и C_t (угловой коэффициент прямой), определяют коэффициенты фильтрации K и уровнепроводности a соответственно из выражений (3.13):

$$K = \frac{0,366Q}{C_t} \text{ и } \lg a = 2\lg r - 0,35 + \frac{A_t}{C_t}. \qquad (3.13)$$

При построении графиков $S = f(\lg t)$ и $(2H_e - S)S = f(\lg t)$ понижение уровня и время выбираются в наиболее удобных размерностях (понижение в метрах или сантиметрах, время – в сутках, часах, минутах). Необходимо только помнить, что размерность коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) зависит от размерностей понижения уровня и времени, выбранных при построении графика. Так, при измерении понижения уровня в метрах, а времени — в сутках пьезопроводность будет иметь размерность м^2/сут. (S в м, t в ч, a в м^2/ч). Размерность водопроводимости или коэффициента фильтрации, определяемых по формулам таблицы 3.2 и (3.13), зависит только от размерности дебита. При измерении Q в м^3/сут. размерность водопроводимости будет м^2/сут., а коэффициента фильтрации — м/сут.; при измерении Q в м^3/ч размерность T будет м^2/ч, а K— м/ч, и т. д.

При определении параметров по центральной скважине в расчетные формулы подставляется $r = r_c$, а по наблюдательной — расстояние ее до центральной. Как показывает опыт, определение коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) по центральной скважине обычно дает неудовлетворительные результаты из-за неучета сопротивлений, возникающих в призабойной зоне. Поэтому для достоверного определения значений a рекомендуется использовать опытные данные по наблюдательным скважинам.

При нанесении результатов откачек на графики $S = f(\lg t)$ и $(2H_e - S)S = f(\lg t)$ не все точки наблюдений укладываются на прямые линии. В силу влияния разнообразных факторов (технические условия проведения опыта, строение пласта, режим подземных вод, влияние непроницаемых границ и источников питания и др.) графики прослеживания могут характеризоваться разбросом точек и отклонениями опытных зависимостей от прямолинейных. В таких условиях уже сама форма графиков временного прослеживания может свиде-

тельствовать об особенностях фильтрации в процессе опыта и способствовать идентификации гидрогеологических условий. На рисунке 3.19 представлены типовые графики $S = f(lgt)$, характеризующие закономерности изменения уровня во времени в различных гидрогеологических условиях (типовые расчетные схемы) при действии различных факторов. Анализ этих графиков позволяет более целенаправленно и обоснованно подходить к проведению опытных работ, интерпретации их результатов и определению расчетных гидрогеологических параметров.

При откачке из напорного водоносного горизонта, изолированного в разрезе и не ограниченного в плане (рис. 3.19, а), на графике $S = f(lgt)$ выделяется

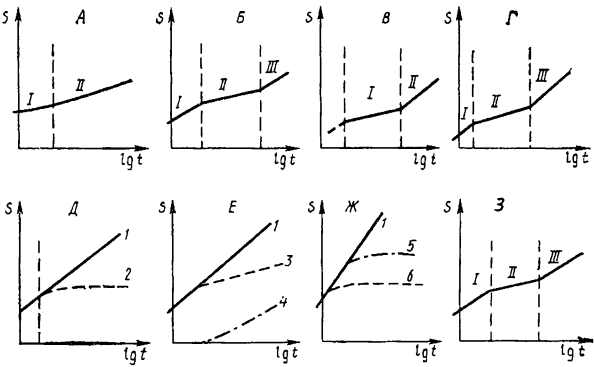


Рис. 3.18. Закономерности изменения уровня при откачках и типовых гидрогеологических условиях: *А* — неограниченный напорный однородный пласт; *Б* — безнапорный пласт; *В* — пласты, сложенные трещиноватыми и трещинно-карстовыми породами; *Г* — двухслойная толща с изменяющимся напором в верхнем слое; *Д* — слоистая толща с постоянным напором в верхнем слое; *Е* — слоистая толща с разделяющим водоупором при переменном напоре в верхнем слое; *Ж* — водоносный пласт у реки; *З* — пласт с границей неоднородности по водоотдаче (напорно-безнапорный пласт); 1 — по Тейсу; 2 — при перетекании; 3 — при перетекании в опробуемом горизонте; 4 — при перетекании в питающем горизонте; 5 — при несовершенной связи с рекой; 6 — при совершенной связи с рекой

два участка: криволинейный *I*, отвечающий периоду неустановившейся фильтрации, и соответственно экспоненциальной зависимости (3.1) понижения *S* от времени *t*, и прямолинейный *II*, характеризующийся логарифмической зависимостью понижения уровня от времени и отвечающий периоду квазиустановившейся фильтрации. Разброс точек на графике объясняется главным образом нерегулярными изменениями дебита (особенно по возмущающим скважинам) и ошибками при замерах. В связи с этим необходимо проводить частичную отбраковку точек и осреднение графика. При этом для осреднения используют совокупность точек, явно тяготеющую к прямолинейной зависимости. Допустимой считается такая степень рассеяния точек, при которой относительное расхождение между коэффициентами водопроводимости по крайним вариантам рисовки прямой не превышает 25% .

При откачке из безнапорного не ограниченного в плане горизонта (рис. 3.18, Б) режим движения подземных вод может быть заметно осложнен проявлением вертикальных составляющих скорости фильтрации у скважины, изменением водоотдачи во времени и другими факторами, в связи с чем график зависимости $(2H_e - S)S = f(lgt)$ будет иметь более сложный вид, чем при откачке из напорного водоносного горизонта.

В общем случае (рис. 3.18, *Б*), на графике $(2H_e - S)S = f(lgt)$ выделяются три участка I, II и III, характеризующиеся специфическими режимами фильтрации. В первый период откачки (участок I) понижение формируется практически так же, как и в напорном изолированном пласте с упругой водоотдачей при логарифмическом характере изменения понижения уровня во времени. Во второй период (участок II) отмечается выполаживание графика, вызванное замедлением темпа снижения уровня в процессе формирования гравитационной водоотдачи (эффект Болтона). Отличительной особенностью этого периода является кажущаяся стабилизация уровня к его концу, в связи с чем он получил название периода ложностационарного режима. Продолжительность его зависит от коэффициента фильтрации водоносного горизонта, его водоотдачи и мощности и, как показывает опыт откачек из безнапорных горизонтов, составляет обычно несколько суток. Наличие периода ложностационарного режима предъявляет особые требования к методике проведения опытных откачек. Если, например, откачка будет закончена до начала третьего периода, то могут быть сделаны качественно неверные выводы о практической стабилизации движения и получены завышенные параметры.

Третий участок графика $(2H_e - S)S = f(lgt)$ соответствует логарифмической аппроксимации уравнения Тейса при гравитационной водоотдаче. Таким образом, в безнапорных водоносных горизонтах, залегающих в рыхлых отложе-

ниях, в отличие от напорных пластов квазистационарный режим при гравитационной водоотдаче формируется с определенным запаздыванием, и это необходимо учитывать при проведении откачек и их обработке.

Анализ фактических данных показывает, что первые два участка отмечаются далеко не на всех графиках. Интерпретация результатов временного прослеживания в таких условиях связана с необходимостью поиска представительного расчетного участка. Определяемые параметры должны быть подтверждены другими способами прослеживания (комбинированным и площадным).

Аналогичные отмеченным закономерности поведения уровня наблюдаются при откачках из водоносных горизонтов, сложенных трещиноватыми и трещинно-карстовыми породами (рис. 3.18, В), и из двухслойной толщи с изменяющимся напором в верхнем слое (рис. 3.18, Г). Детальный анализ закономерностей поведения уровня при откачках для этих и других типовых схем, изображенных на рисунке 3.18, приведен в специальных методических руководствах, там же даны и рекомендации по проведению опытных работ и интерпретации их результатов в конкретных условиях.

Аналогично изложенному проводится определение параметров графоаналитическим методом с использованием графика $S = f[lg(t/r^2)]$, аппроксимирующего зависимость (3.7), и графика $S = f(lgr)$, аппроксимирующего зависимость (3.8), т. е. способами комбинированного и площадного прослеживания уровня.

При комбинированном прослеживании используется информация о поведении уровня во времени одновременно по нескольким наблюдательным скважинам с построением общего графика $S = f(lgt/r^2)$, и последующим определением на его основе коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности по формулам таблицы 3.2.

При влиянии специфических факторов (постепенное формирование гравитационной водоотдачи во времени, трещиноватые породы с двойной пустотностью) могут отмечаться несовпадения данных по отдельным скважинам с постепенным их выходом на общую асимптотическую часть графика, которая и является в таких условиях расчетной (рис. 3.19, а, 1–3 — номера наблюдательных скважин).

Следует отметить, что при обработке результатов откачек способом комбинированного прослеживания построение графиков проводится в системе координат $S - lg(r^2/t)$, или $S - lg(t/r^2)$, что отражается лишь на уклоне графиков (слева направо или справа налево).

При площадном прослеживании используется информация о поведении уровня по площади с построением графика $S = f(lgr)$ на основе единовремен-

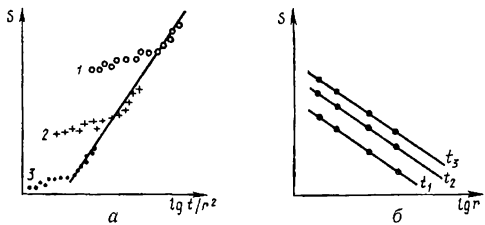


Рис. 3.19. Графики комбинированного (*а*) и площадного (*б*) прослеживания уровня

ных замеров в наблюдательных скважинах. Для контроля графики $S = f(lgr)$ обычно строят на несколько моментов времени, удовлетворяющих критерию $t \geq 2{,}5r^2/a$. Отклонения от прямолинейной зависимости обычно отмечаются на конечных участках графиков $S = f(lgr)$, так как дальние скважины могут не попасть в зону квазистационарного режима. Надежным критерием квазистационарности и свидетельством однородности пласта является параллельность прямолинейных графиков $S = f(lgr)$, построенных на разные моменты времени (рис. 3.19, б). Значения параметров T и a определяются аналогично вышеизложенному по расчетным формулам таблицы 3.2 с использованием величин A_r и C_r, снимаемых с прямолинейной части графика $S = f(lgr)$.

Графоаналитическое прослеживание восстановления уровня

Рассмотренные методы прослеживания уровня, подбора и эталонной кривой применимы также для определения параметров по данным наблюдений за восстановлением уровня после прекращения откачки. При этом вместо понижений берут повышения уровней, отсчитываемые от динамических уровней, замеренных перед окончанием откачки; за расчетный дебит принимается расход воды при откачке; время t отсчитывается от конца откачки. Обработка данных восстановления уровня может быть выполнена с учетом или без учета «наследства» откачки.

При не очень длительных откачках (при соблюдении критерия $t \geq 0{,}1t_0$) обработку данных о восстановлении уровней в скважинах следует вести с учетом продолжительности откачки. В качестве уравнения, описывающего восстановление уровня, используется следующее выражение:

$$S=\frac{0,183Q}{T}tg\frac{(t_0+t)}{t}, \qquad (3.14)$$

которое учитывает одновременное действие как бы продолжающейся откачки и нагнетания воды с тем же дебитом (нагнетание учитывается с момента реального прекращения откачки).

В соответствии с этой формулой определение параметров осуществляется способом временного прослеживания, на основе построения графиков в координатах

$$S - lg(t_0 + t)/t] \text{ или } S - lg[t/(t_0 + t)]$$

(здесь t_0 — длительность откачки, t — время восстановления, отсчитываемое от конца откачки). С учетом определяемого по графику углового коэффициента C_t параметры пласта рассчитываются по формулам:

$$T = 0,183Q/C_t \text{ и } lga = 2lgr - 0,35 + S_{max}/C_t - lgt_0, \qquad (3.15)$$

где S_{max} — максимальное понижение или восстановление уровня.

При длительных откачках и быстром восстановлении уровня (т. е. при $t \geq 0,1t_0$) влиянием «наследства» откачки можно пренебречь и считать справедливым для учета восстановления уровня уравнение в форме (IV.2). Тогда обработка данных восстановления уровня проводится точно так же, как и для понижения, т. е. способами временного, комбинированного и площадного прослеживания с использованием информации по периоду восстановления уровня, отвечающему критерию $t \geq 0,1t_0$. При этом остаются справедливыми все расчетные формулы таблицы 3.2.

По результатам обработки восстановления уровня получают, как правило, более качественные определения, чем по данным о снижении уровней вследствие незначительного влияния на ход восстановления уровня технических факторов, таких, как изменение дебита при откачке, эффект заполнения емкости скважин и др. Последнее следует учитывать лишь для возмущающих скважин при условии $Qt/v\omega Smax = 20$ (здесь t — время восстановления, ω — площадь сечения скважины, $Smax$ — величина восстановления уровня).

Располагая значениями водопроводимости и пьезопроводности, определенными по преобразованным графикам понижения или восстановления уровня в наблюдательных скважинах, можно графоаналитически определить показатель суммарного сопротивления ζ_0 по данным понижения уровня в центральной скважине. Для этого необходимо построить график зависимости $S_t' = f[ln(R_П/r_c)]$. Если откладывать по оси абсцисс значения $ln(R_П/r_c)$ (где на каждый момент времени величина радиуса влияния определяется по зависи-

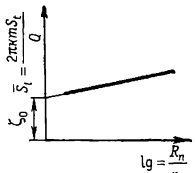


Рис. 3.20. Графоаналитическое определение показателя ζ_0

мости $R_п = 1{,}5\sqrt{at}$), а по оси ординат — значения $S_t' = 2pKmS_t/Q$ (где S_t — понижение уровня воды в центральной скважине на соответствующий момент времени t), опытные данные при таком построении должны укладываться на прямую, которая будет отсекать на оси ординат отрезок, численно равный величине показателя суммарного сопротивления скважины ζ_0 (рис. 3.20).

Аналитические методы определения параметров при квазиустановившемся характере фильтрации основаны на сопоставлении величин понижения уровня S_1 и S_2, фиксируемых в одной и той же точке (скважине) на два момента времени t_1 и t_2 либо в двух точках потока, расположенных на расстояниях r_1 и r_2 от возмущающей скважины, на один и тот же момент времени. Эти методы могут использоваться при отсутствии систематических замеров понижения уровня и невозможности применения графоаналитических методов определения параметров.

Соответствующие формулы для аналитических расчетов могут быть легко получены при рассмотрении разности двух понижений уровня с использованием при этом исходного уравнения квазиустановившейся фильтрации (3.2). При сопоставлении понижений уровня в одной точке на два момента времени для определения водопроводимости и пьезопроводности используются формулы:

$$T = \frac{0{,}183Q}{S_2 - S_1}\lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \text{ и } \lg a = \frac{5{,}47TS_1}{Q} - \lg\left(\frac{2{,}25t_1}{r^2}\right). \qquad (3.16)$$

При сопоставлении понижений по двум точкам на один и тот же момент времени t — соответственно формулы:

$$T = \frac{0{,}366Q}{S_1 - S_2}\lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ и } \lg a = \frac{5{,}47TS_1}{Q} - \lg\left(\frac{2{,}25t_1}{r_1^2}\right). \qquad (3.17)$$

Попутно заметим, что при сопоставлении понижений S_1 и S_2, фиксируемых в двух точках потока в любой момент времени X периода квазиустановившейся фильтрации, расчетная формула для определения водопроводимости (3.17) оказывается идентичной соответствующей формуле установившейся фильтрации. Это лишний раз подтверждает необоснованность требования о проведении опытных откачек до стабилизации уровней и возможность использования основных приемов и зависимостей установившейся фильтрации для обработки результатов откачки в условиях квазиустановившегося режима.

Учет характера возмущения в процессе откачек

Обязательными условиями применимости изложенных методов и приемов определения параметров являются постоянство дебита опытной скважины и однородность пород опробуемого горизонта. При нарушении этих условий требуются соответствующая корректировка приемов обработки результатов откачек и учет возможных отклонений.

Изменение дебита опытной скважины в процессе откачки ведет к усложнению приемов обработки ее результатов, увеличению трудоемкости и вероятности случайных ошибок, поэтому вполне обоснованным и правильным является стремление к проведению откачек с постоянным дебитом, к сосредоточению возмущающих скважин при групповой откачке и их одновременному пуску.

Если в процессе откачки наблюдаются незакономерные колебания дебита относительно его средней величины, то в расчет принимается осредненное значение дебита, и обработка результатов откачки ведется по методике, учитывающей постоянство дебита. При закономерных изменениях дебита (ступенчатое, линейное, параболическое и др.) применяются другие приемы учета этих изменений, которые можно проиллюстрировать на примере обработки результатов опытных выпусков и групповых откачек.

Опытные выпуски. При кустовых опытных выпусках, практикуемых при избыточных напорах над устьем опробуемых скважин, имеют место постоянное понижение и переменный во времени дебит для опытных скважин и переменное понижение уровня в наблюдательных скважинах. Это приводит к необходимости применения различных способов определения параметров: для опытной (возмущающей) скважины по временной закономерности изменения дебита, для наблюдательных — по закономерностям изменения приведенного понижения

$$S^{\cdot} = S/Q_t = f(t).$$

Обработка данных выпуска по возмущающей скважине ведется на основе формулы (3.18), в соответствии с которой при $at/r_c^2 > 100$

$$Q_t = \frac{TS_c}{0{,}183 \lg\left(2{,}25at/r_c^2\right)}, \qquad (3.18)$$

где S_c — постоянное во времени понижение уровня в опытной скважине.

Представляя зависимость (3.18) в виде уравнения прямой линии $1/Q_t = A_t + C_t lg(t)$, где $C_t = 0{,}183/TS_c$ — угловой коэффициент, а A_t — начальная ордината прямолинейной части графика $1Q_t = f(lgt)$, получаем возможность

определения водопроводимости T по величине углового коэффициента, т. е. $T = 0{,}183/C_tS_c$. Определение пьезопроводности по возмущающей скважине производить нецелесообразно.

При опробовании глубоких горизонтов (>200 м) и значительном дебите опытной скважины величину S_c следует принимать с учетом потерь напора ΔH в скважине, определяемых по формуле (3.19):

$$\Delta H = 30{,}9\frac{Q^{1{,}85}L}{d^5}, \qquad (3.19)$$

где Q — дебит скважины, л/с; L — длина колонны обсадных труб, м; d — внутренний диаметр колонны, см (ΔH определяется в м).

Понижение уровня в наблюдательных скважинах при выпусках с $S = const$ для периода времени $t_k = 500r^2/a$ аппроксимируется уравнением вида (3.19), в котором дебит изменяется по зависимости (IV.19) и которое может быть записано в виде прямой относительно приведенного понижения S/Q_t в различных координатах, аналогично тому, как это было показано на примере откачек с постоянным дебитом. Таким образом, для обработки данных об изменении понижений уровня в наблюдательных скважинах, при выпуске с переменным дебитом можно использовать рассмотренные выше приемы временного, площадного и комбинированного прослеживания с той лишь разницей, что при этом рассматриваются зависимости изменения приведенного понижения $S^- = S/Q_t$ и соответственно составляются графики прямых $S/Q_t = A_t + C_tlgt$ (при временном прослеживании $S/Q_t = A_r - C_rlgr$ (при площадном прослеживании) и $S/Q_t = A_k + C_klg(t/r^2)$ при комбинированном прослеживании).

Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определяются по угловым коэффициентам и начальным ординатам прямолинейных частей получаемых графиков по формулам, приведенным в таблице 3.2, с той лишь разницей, что в формулы для определения водопроводимости не входит величина дебита, которая учитывается в значениях приведенного понижения S/Q_t.

Для обеспечения более достоверного определения параметров и контроля обработку данных опытных выпусков следует вести всеми возможными способами, отдавая предпочтение методам прослеживания понижения перед методами прослеживания восстановления уровня, особенно при значительных изменениях дебита (в 1,5–2 раза) в процессе опытов.

Отметим, что рассмотренные приемы обработки опытных данных применимы при обработке откачек с переменным дебитом, который имеет линейный, логарифмический или параболический характер изменения. В расчет-

ных формулах для определения пьезопроводности вместо числового коэффициента 0,35 используется коэффициент 0,08 при линейном и 0,29 при логарифмическом и параболическом характерах изменения дебита.

По аналогичной методике обрабатываются и данные групповых выпусков, когда в качестве дебита Q_t рассматривается суммарный дебит возмущающих скважин, а в качестве расстояния r до наблюдательных скважин принимается приведенное расстояние $r_{пр}$, которое определяется из условия:

$$\lg r_{пр} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \lg r_i / Q_{сум}.$$

Для наблюдательных скважин ведется обработка с построением графиков $S/Q_{сум} = f(\lg t)$, $S/Q_{сум} = f(\lg r_{пр})$, $S/Q_{сум} = f(\lg t/r_{пр}^2)$. Для возмущающих скважин строится график временного прослеживания суммарного дебита $1Q/сум = f(\lg t)$ с определением водопроводимости по формуле $T = 0{,}183/C_t S_c$, в которой вместо S_c принимается среднеарифметическое понижение по всем возмущающим скважинам.

Групповые откачки. Для обеспечения ощутимого понижения уровня в водообильных пластах выполняются откачки из нескольких опытных скважин одновременно (групповые откачки). Время включения каждой возмущающей скважины в действие может быть разным (асинхронное возмущение) или одновременным (синхронное возмущение), сами возмущающие скважины могут быть сосредоточенными или рассредоточенными, дебит их может быть постоянным или скачкообразно меняющимся. Основываясь на принципе суперпозиции и рассматривая каждую ступень изменения суммарного дебита групповой откачки $\pm\Delta Q_I$ как самостоятельное возмущение, можно представить понижение в любой наблюдательной скважине в виде суммы понижений от каждого возмущения ΔQ). Путем несложных преобразований суммы понижений, каждое из которых описывается уравнением (3.2), получаем следующую формулу:

$$S = \frac{0{,}183Q_n}{T} \lg \frac{2{,}25at_{пр}}{r_{пр}^2}, \qquad (3.20)$$

где Q_n — суммарный дебит системы скважин на данной ступени возмущения, $t_{пр}$ и $r_{пр}$ — приведенное время опыта и приведенное расстояние. Приведенное время опыта определяется в соответствии с выражением

$$\lg t_{пр} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg(t - t_2) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg(t - t_n)}{Q_n}, \qquad (3.21)$$

где Q_1 — начальный суммарный дебит; ΔQ_i — соответствующее изменение суммарного дебита ($i = 1,2,..., n - 1$), $\Delta Q_1 = Q_2 - Q_1$, ... $\Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1}$; t — текущее время опыта от начала работы всей системы; t_i — время начала соответствующих ступеней суммарного дебита ($i = 1, 2, 3, ..., n$). Знак плюс означает возрастание, минус — уменьшение суммарного дебита. Приведенное расстояние до рассматриваемой наблюдательной скважины $r_{ПР}$ определяется с учетом выражения

$$\lg r_{пр} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \lg r_i / Q_n,$$

где Q_i — дебиты отдельных возмущающих скважин на данной ступени возмущения ($1 = 1, 2, ..., n$); r_i — расстояния от интересующей наблюдательной до каждой действующей возмущающей скважины (знак плюс означает включение, знак минус – остановку соответствующей возмущающей скважины).

Обработка данных группового асинхронного опыта производится способом, аналогичным обработке откачек с постоянным дебитом, т. е. временным, площадным и комбинированным прослеживанием на основе графиков в координатах $S - lgt_{пр}$, $S - lgr_{пр}$, $S - lg(t_{пр}/r^2_{пр})$. Обработка производится раздельно для каждой ступени возмущения. Расчетные формулы аналогичны приведенным в таблице 3.2, при этом в них принимается $t = t_{пр}$ и $r = r_{пр}$.

Варианты рассредоточенного синхронного и сосредоточенного асинхронного возмущения являются частными случаями рассмотренного группового асинхронного возмущения. В первом случае нет необходимости в учете приведенного времени ($t_{пр} = t$), во втором — в учете приведенного расстояния ($lgr_{пр} = lgr$). При скачкообразном характере возмущения обработка результатов групповых откачек может осуществляться с использованием графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания приведенного понижения S/Q на всех ступенях возмущения, что обеспечивает наибольшую степень свертывания опытной информации и надежность получаемых результатов.

Откачки в условиях ограниченных пластов и слоистых толщ

Схемы откачки в условиях влияния одной или нескольких границ пласта (проницаемых или непроницаемых), а также в условиях взаимосвязи смежных в разрезе водоносных горизонтов (слоистые толщи) используются в практике гидрогеологических исследований сравнительно редко, так как они требуют применения своеобразных способов обработки опытных данных и приемов интерпретации их результатов. Тем не менее во многих случаях оказы-

вается возможным использовать способы временного, площадного и комбинированного прослеживания применительно к условиям не ограниченного в плане пласта. Основным вопросом при интерпретации графиков прослеживания является выделение наиболее представительного участка графика, который еще не испытывает влияния границ или других действующих факторов и может соответственно использоваться для определения фильтрационных и емкостных свойств опробуемого горизонта. При использовании этих способов обработки и интерпретации опытных данных предъявляются определенные ограничения к исходной информации.

В частности, в зоне потока размером $m \le r \le 0{,}45l$ (где l — расстояние от возмущающей скважины до ближайшей границы) в течение времени $t_k = t = 5t_k$ с достаточной для целей практики точностью (погрешность < 10%) справедлива логарифмическая аппроксимация формулы Тейса в виде (3.2). Это дает основания к использованию информации по всем наблюдательным скважинам, расположенным в этой зоне, для определения параметров всеми рассмотренными выше для условий квазистационарной фильтрации графоаналитическими и аналитическими методами (как и прежде, здесь $t_к = r^2/a$). При этом для временного и комбинированного прослеживания следует использовать наблюдательные скважины, расположенные в зоне радиусом $r = 0{,}3l$, а для площадного — в зоне $r = 0{,}45l$, ориентируясь в основном на информацию о понижении уровня при откачках. Другие методы определения параметров в сложных гидрогеологических условиях основаны на использовании зависимостей, учитывающих влияние проницаемых и непроницаемых границ пласта в плане и в разрезе, а также особенности строения области фильтрации. При этом, как и для схемы неограниченного пласта, широко применяются графоаналитические методы, основанные на линейной аппроксимации исходных зависимостей, а также аналитические зависимости, получаемые на основе точных или приближенных решений.

Для простейших схем полуограниченных потоков, когда на условия притока воды к скважине в процессе откачки влияет одна из границ потока (проницаемая с $H = const$ или непроницаемая с $Q = const = 0$), расчеты параметров можно выполнять по формулам, приведенным в настоящем параграфе, с введением в них вместо действительных расстояний r_i от наблюдательных скважин по центральной и радиуса центральной скважины r_c некоторых приведенных значений r_i^* и r_c^*, которые учитывают характер и положение границы потока. При расположении скважин у контура постоянного напора (река, озеро, канал) принимают $r_i^* = r_i/\rho_i$ и $r_c^* = r_c/\rho_c$, у непроницаемого контура — соответственно $r_i^* = r_i\rho_i$ и $r_c^* = r_c\rho_c$, где ρ_i и ρ_c — расстояния от реальных

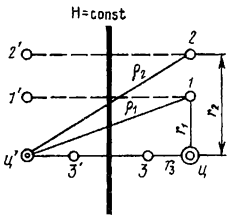


Рис. 3.21. Схема к расчету параметров по данным кустовой откачки в полуограниченном пласте

наблюдательных и центральной скважин до зеркального отображения центральной скважины относительно рассматриваемого контура (рис. 3.21).

Так, например, при откачке из одиночной скважины в напорном потоке у реки для определения водопроводимости может использоваться формула Ф. Форхгеймера, откуда:

$$T=\frac{0,366Q}{S}\lg\left(\frac{\rho_c}{r_c}\right). \qquad (3.22)$$

При кустовой откачке и наличии двух наблюдательных скважин (рис. 3.22) величину водопроводимости можно определять по парам скважин (центральная — наблюдательная либо две наблюдательные) по формулам, аналогичным формуле (3.17), которая с учетом значений r_i^* и ρ_i^* приобретает вид:

$$T=\frac{0,366Q}{S}\lg\left(\frac{\rho_c}{r_c}\right). \qquad (3.23)$$

Аналогичным образом могут быть записаны расчетные формулы и для других схем расположения скважин.

Одним из важнейших параметров, который может быть определен по результатам откачек на прибрежном участке, является дополнительное фильтрационное сопротивление ложа реки ΔL, которое интегрально учитывает несовершенство вреза и фильтрационную неоднородность русловых отложений. Для его определения можно использовать несколько методов. Один из них — метод подбора величины ΔL, удовлетворяющей уравнению Форхгеймера, записанному применительно к определению величины понижения в одной из наблюдательных скважин. Например, для определения понижения в наблюдательной скважине № 3 (рис. 3.22) расчетная формула имеет вид:

$$S_3=\frac{0,366Q}{T}\lg\frac{2(l+\Delta L)-r_3}{r_3}. \qquad (3.24)$$

При известных величинах водопроводимости (определяется заранее, например, по наблюдательным скважинам на параллельном реке луче) и пони-

жения S_3 значение ΔL определяется подбором по формуле (3.24). Метод подбора может использоваться и в других модификациях (например, по соотношению понижений в двух точках).

Более универсальным является графоаналитический способ подбора, заключающийся в построении серии графиков $S = f(lg\rho_i/r_i)$, использующих информацию по нескольким наблюдательным скважинам (здесь ρ_i — расстояние от рассматриваемых наблюдательных скважин до зеркального отображения возмущающей скважины с учетом принимаемого значения ΔL). Как следует из формулы (3.23), график $S = f(lg\rho/r)$ должен быть прямолинейным, проходящим через начало координат, с угловым коэффициентом $C = 0{,}366Q/C$. Из серии графиков, построенных при различных значениях ΔL, за расчетный принимается график, приходящий в начало координат. Величина водопроводимости определяется исходя из углового коэффициента этого графика по формуле $T = 0{,}366Q/C$.

При значительном количестве наблюдательных скважин, расположенных в зоне $r = 0{,}5l$ (где l — расстояние от возмущающей скважины до реки), возможно определение параметра ΔL на основе построения графика площадного прослеживания $S = f(lgr)$. При этом совместно определяются водопроводимость (по формуле табл. 3.2) и параметр ΔL (по величине условного радиуса питания r_0, отсекаемого прямолинейным графиком на оси абсцисс), который будет равен $\Delta L = 0{,}5r_0 - l$.

По результатам откачек из слоистых пластов в условиях перетекания для определения параметров (водопроводимости T, пьезопроводности a, перетекания B и др.) используют охарактеризованные ранее методы подбора и эталонных кривых, имея в виду, что при этом справедливо уравнение

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W_n(u, \bar{r}), \tag{3.25}$$

где $W_n(u, \bar{r})$ — специальная табулированная функция, значения которой определяются в зависимости от $u = r^2/4at$ и $\bar{r} = r/B$ (где B — коэффициент перетекания).

В условиях неустановившейся фильтрации по данным о снижении уровня в наблюдательной скважине строится график в координатах $lgS - lg(t/r^2)1$, который совмещается затем с эталонным графиком, представляющим собой серию кривых зависимости $W_n(u, \bar{r})$ от $lg(1/u)$ для различных значений $\bar{r} = r/B$ (рис. 3.23). По значению r/B совмещенной эталонной кривой при известном расстоянии r определяется коэффициент перетекания B, а коэффициенты

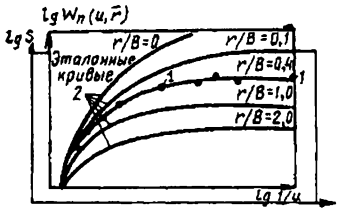


Рис. 3.22. Определение параметра по эталонным кривым в условиях перетекания: 1 — фактические точки графика $lgS - lg(t/r^2)$; 2 — эталонные кривые

водопроводимости и пьезопроводности находятся по координатам любой точки совмещенных графиков из соотношений:

$$\lg(Q/4\pi T)=\lg S-\lg W_n(u,\bar{r}) \quad \text{и} \quad \lg 4a=\lg(1/u)-\lg(t/r^2). \tag{3.26}$$

Более надежные значения параметров получаются при использовании информации по нескольким наблюдательным скважинам. При этом совмещение опытных кривых с эталонными осуществляется таким образом, чтобы удовлетворялось условие:

$r_1/r_2 = \bar{r}_1/\bar{r}_2$; $r_2 r_3 = \bar{r}_2/\bar{r}_3$ .... Определение параметров по совмещенным графикам осуществляется аналогично вышеизложенному.

В условиях длительных откачек при стабилизации понижений в наблюдательных скважинах, когда уравнение (3.26) принимает соответственно вид, используется либо метод подбора в форме:

$$\frac{s_{r_1}}{s_{r_2}}=\frac{K_0(r_1/B)}{K_0(r_2/B)} \qquad S=\frac{Q}{2\pi T}K_0(\bar{r}),$$

либо метод эталонной кривой. В подследнем случае опытный график $lgS = f(lgr)$ совмещается с эталонной кривой, построенной в том же масштабе в координатах $lgK_0(\bar{r}) - lg\,\bar{r}$, а параметры T и B определяются по координатам любой точки совмещенных графиков соответственно из соотношений:

$$\lg(Q/4\pi T)=\lg S-\lg K_0(\bar{r}) \quad \text{и} \quad \lg B=\lg r-\lg\bar{r}. \tag{3.27}$$

Рассмотренные приемы определения параметров слоистых толщ справедливы для условий постоянства напора в питающих пластах. При этом длительность откачек должна быть достаточна для проявления эффекта перете-

кания. При отсутствии его проявления для определения параметров пласта (T, a, μ) используются изложенные ранее для схемы изолированного в разрезе пласта способы и приемы.

Говоря о методах определения параметров, ограниченных в плане водоносных образований, следует несколько остановиться на своеобразном приеме определения обобщенных параметров, под которыми обычно понимают такие параметры, которые комплексно характеризуют опробованную часть водоносного пласта с учетом его водопроводящих и емкостных свойств и влияние его внешних границ. Обобщенные параметры определяются по конечным прямолинейным участкам графиков прослеживания $S = f(lgt)$, которые количественно учитывают влияние установленных непроницаемых или полупроницаемых границ пласта, а прогнозные расчеты ведутся по зависимостям для не ограниченного в плане пласта, т. е. реальный пласт при расчетах заменяется некоторым неограниченным пластом, который с учетом определенных для него обобщенных параметров является эквивалентом реальной области фильтрации, проявившей себя в процессе опыта. Один из наиболее важных и сложных вопросов при определении таких обобщенных параметров — вопрос о необходимой продолжительности откачек, обеспечивающей проявление всех основных факторов и границ области фильтрации, и соответствующий их учет в обобщенных параметрах.

3.2.3. Методика организации и проведения откачек

Методика проведения откачек зависит от их назначения, стадии гидрогеологических исследований и конкретных природных условий изучаемого месторождения подземных вод. В понятие методики включаются вопросы выбора вида откачки, схемы опытного куста и его местоположения, характера и степени возмущения, продолжительности откачки и контроля ее проведения, обоснования конструктивных особенностей опытных и наблюдательных скважин.

Выбор вида откачки (пробная, опытная одиночная, кустовая или групповая, опытно-эксплуатационная) определяется ее целевым назначением и стадией исследований.

Пробные откачки выполняются на всех стадиях гидрогеологических исследований: на стадии поисков — для сравнительной характеристики фильтрационных свойств пластов на отдельных участках, оценки качества воды и положения уровней водоносных горизонтов; на стадиях предварительной и детальной разведки — для оценки качества скважин и предварительного определения их возможной производительности.

Опытные одиночные откачки проводятся на стадиях предварительной и детальной разведки из разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин с целью определения зависимости дебита от понижения уровня. Для решения этой задачи требуются откачки на две ступени понижения уровня в зернистых коллекторах и на две-три ступени в трещиноватых. При хорошем качестве призабойной зоны одиночные откачки могут использоваться для ориентировочной оценки водопроводимости. Информативность и надежность результатов одиночных откачек могут быть повышены при совместном их проведении и увязке с кустовыми откачками, расходометрией и резистивиметрией.

Опытные кустовые откачки осуществляются на стадиях предварительной и детальной разведок главным образом для определения расчетных гидрогеологических параметров и оценки граничных условий. Если при откачке из одной скважины не удается добиться достаточно надежных для последующей интерпретации понижений уровня (в связи с высокой водопроводимостью водоносных горизонтов), проводится групповая откачка.

Опытные кустовые откачки — основной вид фильтрационного опробования, обеспечивающий правильную интерпретацию изучаемых гидрогеологических условий, надежное определение гидрогеологических параметров и контроль получаемых результатов. Поэтому дальнейшее рассмотрение вопросов методики проведения откачек дается главным образом применительно к кустовым откачкам.

Опытно-эксплуатационная откачка из одной или нескольких скважин проводится только на стадии детальной разведки в сложных гидрогеологических условиях для определения опытным путем возможной производительности водозабора или установления закономерностей изменения уровней при его эксплуатации, а также возможного изменения качественного состава подземных вод. Откачка проводится, как правило, в период меженного стояния уровня подземных вод с одним максимально возможным дебитом (близким к проектному) продолжительностью 1–3 месяца и более. На каждом конкретном участке продолжительность опытно-эксплуатационной откачки должна обеспечивать квазистационарный режим по всем возмущающим и наблюдательным скважинам, а также проявление и учет всех основных факторов, осложняющих условия эксплуатации изучаемого месторождения. Схема расположения опытных скважин должна задаваться с учетом схемы расположения эксплуатационных скважин проектируемого водозабора.

Выбор местоположения и схемы опытного куста следует увязывать с положением и характером работы проектируемых инженерных сооружений

(водозаборов, дренажей, каналов и др.). Расположение опытного куста должно обеспечивать в первую очередь детальное изучение участков проектируемых инженерных сооружений и зоны их влияния, по возможности исключая или сводя к минимуму влияние на условия проведения опыта различных осложняющих факторов (границ пласта в плане, зон неоднородности и др.). При наличии границ наблюдательные скважины следует располагать в зоне квазистационарной фильтрации потока размером $m \le r \le 0/5l$ (где l — расстояние от возмущающей скважины до ближайшей границы), исключающей влияние граничных помех и обеспечивающей надежное определение гидрогеологических параметров методами прослеживания уровня. Если же задачей откачек является изучение граничных условий, опытный куст располагают вблизи изучаемой границы (с размещением наблюдательных скважин по обе стороны от нее), используя для определения гидрогеологических параметров зависимости, учитывающие влияние границ. Расположение точек одиночного опробования также должно способствовать изучению участков проектируемых сооружений и экстраполяции результатов кустовых откачек на прилегающие к ним зоны пласта.

Схема опытного куста, под которой понимается количество возмущающих и наблюдательных скважин и их взаимное расположение в плане и в разрезе, должна обосновываться с учетом степени и длительности предполагаемого возмущения, возможной фильтрационной схемы и методов интерпретации результатов опытных откачек. Ориентировочно она должна быть такой, чтобы при длительности возмущения 5–10 суток и величине понижения уровня в возмущающих скважинах 3–5 м обеспечивалось бы получение представительной информации о развитии депрессионной воронки в зоне квазистационарной фильтрации и чтобы при этом разность понижений в соседних наблюдательных скважинах и понижение в наиболее удаленной наблюдательной скважине существенно превышали точность замеров уровня подземных вод, составляя не менее 0,2–0,3 м. Подобное расположение скважин обеспечивает достоверное определение гидрогеологических параметров методами временного и площадного прослеживания уровня.

Количество наблюдательных скважин назначается в зависимости от степени сложности природных условий и интерпретируемости опытных данных, степени неоднородности пластов, глубины залегания опробуемых горизонтов и возможности использования в качестве наблюдательных других гидрогеологических скважин.

Для обеспечения надежного определения расчетных гидрогеологических параметров, их осреднения и контроля количество наблюдательных скважин

в опытном кусте даже в сравнительно простых природных условиях должно быть не менее трех (при наличии принципиальной возможности определения всех параметров по одной-двум наблюдательным скважинам). В сложных природных условиях (поровые грунтовые и трещинные грунтовые и напорные водоносные горизонты, слоистые толщи в условиях перетекания, неоднородность фильтрационных свойств) необходимо иметь 4–5 наблюдательных скважин, а в очень сложных природных условиях (трещинно-карстовые водоносные горизонты, существенная неоднородность, сочетание нескольких факторов аномальности) — от 4 до 10 наблюдательных скважин. Кроме наблюдательных скважин в зоне возмущения следует предусматривать хотя бы одну наблюдательную скважину вне ее (для выявления возможных фоновых изменений естественного режима). Во всех случаях (особенно при опробовании глубоких горизонтов), если имеется возможность увеличения числа наблюдательных скважин без дополнительных затрат (за счет использования ранее пройденных поисковых, картировочных, разведочных, режимных и других категорий скважин), следует этим воспользоваться (особенно в сложных для интерпретации природных условиях), а иногда даже пойти ради этого на увеличение продолжительности опыта.

Размещать наблюдательные скважины целесообразно по лучам, количество и ориентировка которых зависят от сложности условий опробуемого объекта, назначения куста, количества наблюдательных скважин и особенностей проектируемого на основе изысканий инженерного сооружения. Лучи наблюдательных скважин следует ориентировать в направлении выявленных или возможных изменений гидрогеологических условий (по направлениям затухающей или преобладающей трещиноватости, резкого изменения фильтрационных и емкостных свойств пород, проницаемых и непроницаемых границ пласта и т. п.). Обычно практикуют одно-, двух- и трехлучевые опытные кусты. Двухлучевые схемы опытных кустов используются при опробовании анизотропных (лучи — по осям анизотропии) и ограниченных пластов (лучи — параллельные и перпендикулярные границам). При малом количестве наблюдательных скважин задается один луч.

Возмущающие скважины (в зависимости от необходимой степени возмущения их может быть от одной до четырех) целесообразно располагать как можно более компактно в вершинах наблюдательных лучей, принимая расстояние между возмущающими скважинами не более $0{,}3\,r_1$ в грунтовых и $0{,}5\,r_1$ в напорных потоках (здесь r_1 — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины). При этом отпадает необходимость в учете приведенных расстояний $r_{пр}$ при обработке результатов групповых откачек.

Наблюдательные скважины, как уже отмечалось, следует размещать в зоне эффективного влияния откачки при квазистационарном ее режиме. При этом первую наблюдательную скважину располагают на расстоянии r_1 от центральной, примерно равном мощности пласта. Последующие скважины размещают по лучам с увеличением расстояния между ними по закону геометрической прогрессии. При этом расстояние от возмущающей до соответствующей наблюдательной скважины r_n может быть определено по следующей полуэмпирической формуле:

$$r_n = r_1 \alpha^{n-1}, \qquad (3.28)$$

где r_1 — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины (принимается обычно $r = (0,7 - 1)m$; m — мощность опробуемого пласта; a — эмпирический коэффициент, принимаемый для безнапорных горизонтов равным 1,5, для напорных — 2,5; n — порядковый номер наблюдательной скважины в луче в направлении от опытной (в одном луче располагают скважины с нечетными номерами, в другом — с четными, в третьем — с последующими нечетными и т. д., рис. 3.23).

В формуле (3.28) эмпирические коэффициенты подобраны таким образом, чтобы при понижении уровня в центральной скважине на 3–4 м и длительности откачки около 10 суток разность понижений уровня в соседних и понижения в наиболее удаленной наблюдательной скважине составляла не менее 0,2 м. Исходя из этих условий максимальное удаление наблюдательных скважин следует ограничивать — 150 м в безнапорных и 1500 м — в напорных водоносных горизонтах.

Опытные кусты для опробования водоносных горизонтов и степени их взаимосвязи с рекой рекомендуется размещать по двухлучевой схеме (рис. 3.23, Б) с расположением не менее двух наблюдательных скважин на каждом из лучей. В параллельном луче скважины располагают в соответствии с вышеизложенными рекомендациями

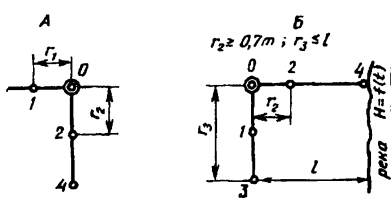


Рис. 3.23. Схема опытного куста: А — в неограниченном пласте; Б — при связи пласта с рекой; 0 — опытная скважина; 1, 2, 3, 4 — наблюдательные скважины

циями [например по формуле (3.28)], но не далее $(0,6–0,7)l$. В луче, перпендикулярном к реке, одну наблюдательную скважину располагают вблизи центральной на расстоянии $r \geq 0,7$ *m*, вторую — непосредственно на урезе реки (на узких реках — еще одну на другом берегу реки). Для оконтуривания воронки депрессии желательно иметь наблюдательную скважину и в направлении коренного берега на расстоянии $r \approx l$, а для учета естественных изменений уровня — еще одну вне зоны влияния откачки.

При опробовании слоистых толщ с перетеканием в первом приближении следует руководствоваться рекомендациями для опытного куста в грунтовых водах (с заложением наблюдательных скважин на все взаимосвязанные горизонты в тех же точках, что и на основной горизонт). При этом одна из наблюдательных скважин должна быть расположена рядом с возмущающей, а самая далекая — быть в зоне $r = (0,34 \div 0,4)\ B$.

Изложенные рекомендации в отношении размещения наблюдательных скважин и продолжительности опытных откачек следует считать ориентировочными, подлежащими уточнению при выполнении полевых работ на каждом конкретном участке с учетом целевого назначения откачек и гидрогеологических особенностей изучаемого объекта. Рекомендуемая схема размещения скважин опытного куста должна проверяться прогнозными расчетами ожидаемых понижений исходя из возможной фильтрационной схемы, предполагаемого дебита и продолжительности откачки, а также ориентировочных значений расчетных гидрогеологических параметров.

Характер и степень возмущения. Современная методика позволяет обрабатывать результаты откачек при скачкообразном, линейном, логарифмическом и более сложном характере возмущения, но при этом существенно возрастает трудоемкость обработки и интерпретации результатов опыта. Поэтому во всех случаях следует стремиться к простому и постоянному в процессе опыта характеру возмущения. Откачки необходимо проводить с постоянным во времени дебитом, отвечающим номинальной производительности выбранного насоса, избегая нерегулярных его колебаний. Опробование скважин, дающих воду самоизливом, возможно при условии постоянства понижения уровня с обязательным получением информации об изменении уровней по наблюдательным скважинам. Однако и в этом случае целесообразно вести опробование с постоянным дебитом, переводя возмущающие скважины на крановый режим выпуска.

При откачках на несколько ступеней понижения их следует проводить, начиная с меньшего понижения уровня (в трещиноватых породах и мелкозернистых неоднородных песках — наоборот), которое должно быть не ме-

нее 1–2 м и вместе с тем в 2–3 раза меньше максимально возможного. При переходе с большего понижения уровня на меньшее откачку прекращают до полного восстановления пониженного уровня воды.

Степень возмущения при откачках должна быть достаточной для того, чтобы при ориентировочной их продолжительности 5–10 суток обеспечить значительное снижение уровня в пределах опробуемой части пласта (не менее 3–5 м в опытных скважинах и не менее 0,2–0,5 м — в наблюдательных) и представительное по времени развитие квазистационарной фильтрации в зоне размещения наблюдательных скважин. Исходя из этих требований для выбора необходимой степени возмущения (дебита откачек) можно воспользоваться следующими рекомендациями, которые обобщают опыт опробования 30 месторождений подземных вод различного типа и результаты аналитических расчетов.

1. При опробовании дочетвертичных песков, слабых песчаников и некарстующихся трещинных водовмещающих пород, коэффициенты водопроводимости которых изменяются в пределах 50–500 м^2/сут., рекомендуются дебиты 5–25 л/с.
2. При опробовании четвертичных аллювиальных песков, аллювиально-пролювиальных песчано-гравийных отложений, трещинно-поровых водовмещающих пород с рассеянным карстом, коэффициенты водопроводимости которых изменяются в пределах 500–1 000 м^3/сут., рекомендуемые дебиты — 25–50 л/с.
3. При опробовании галечников с песчано-гравийным заполнителем и трещинно-карстовых массивов, коэффициенты водопроводимости которых находятся в интервале 1 000–3 000 м^2/сут., рекомендуются дебиты 50–150 л/с.

При назначении дебита возмущающих скважин следует учитывать данные предварительного опробования (пробных откачек и прокачек).

В условиях весьма водообильных горизонтов, обладающих значительной водопроводимостью (>1 000 м^2/сут.), для обеспечения необходимой степени возмущения требуется проведение откачки из нескольких возмущающих скважин (2–4), оборудованных достаточно мощными насосами (групповые откачки). При этом следует обеспечивать компактное их размещение, постоянство дебита и синхронность их работы.

Продолжительность откачек определяется их целевым назначением и гидрогеологическими условиями изучаемых объектов. Она должна обеспечивать определение искомых параметров наиболее надежными методами (как правило, основанными на анализе закономерностей квазиустановившейся фильтра-

ции). Исходя из этого продолжительность пробных и одиночных опытных откачек следует ограничивать 1–2 сутками (при необходимости разглинизации горизонта она может быть увеличена до 2–3 сут.). Продолжительность кустовых откачек должна обеспечивать полное развитие квазистационарной фильтрации в зоне размещения наблюдательных скважин. Исходя из необходимости получения хорошо выраженного прямолинейного участка на графике временного прослеживания целесообразно ориентироваться на продолжительность откачки, определяемую критерием $t \geq 5t_к$, где время наступления квазистационарной фильтрации $t_к$ принимается для дальней наблюдательной скважины из условия $t_к \geq 2{,}5r^2/a$. Наиболее четким критерием для прекращения кустовой откачки служит выход на общую асимптоту графиков комбинированного прослеживания $S = f[lg(t/r^2)]$, построенных для различных наблюдательных скважин, а также получение четко выраженной картины временной изменчивости уровней, характерной для данных гидрогеологических условий.

С учетом изложенных по размещению наблюдательных скважин рекомендаций может быть принята следующая ориентировочная проектная продолжительность кустовых откачек, проводимых для определения основных параметров: 1) при откачках из напорных водоносных горизонтов рыхлых отложений 5–10 суток; 2) при откачках из безнапорных горизонтов рыхлых отложений, из напорных и безнапорных горизонтов трещиноватых и закарстованных пород, а также из горизонтов двухслойного строения — 10–15 суток Такая же продолжительность 10–15 суток рекомендуется при определении степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод при расположении опытных кустов вблизи реки (на расстоянии до 30 м). При удалении опытного куста от реки и при затрудненной связи подземных вод с поверхностными (экранирующий заиленный слой) требуется проведение более длительных откачек (до 20–30 сут.).

Продолжительность специальных кустовых откачек, проводимых для оценки условий взаимосвязи водоносных горизонтов через разделяющие слабопроницаемые отложения, может достигать 30–40 суток и более. Такие откачки желательно проводить при значительном снижении уровня и высоких дебитах возмущающих скважин в условиях, когда имеются существенные предпосылки для перетекания (мощность разделяющих слоев не более 20–30 м, а их коэффициент фильтрации — более 10^{-4} м/сут.).

В процессе проведения откачек ведутся наблюдения за изменением расходов и уровней подземных вод во всех возмущающих и наблюдательных скважинах с постепенно убывающей частотой. Последовательность и частота

замеров уровня, определяемая темпами его снижения в точках наблюдения, должна обеспечивать выявление закономерностей его изменения в процессе опытных работ. Исходя из возможностей и целесообразности комплексного применения различных методов обработки результатов опытных работ рекомендуется проводить замеры уровня в процессе откачки в первые два часа через 5–10 минут, в последующие 12 ч — через 0,5–1 ч и далее через 2–3 ч до конца откачки. Замеры уровня в процессе восстановления: первые 15–20 минут через 1–2 минуты, далее в течение 1–2 ч — через 3–10 минут, затем через час до получения представительных материалов.

Все приведенные количественные рекомендации по размещению опытных кустов, степени и продолжительности возмущения, частоте измерений следует рассматривать как ориентировочные, которые должны уточняться при проектировании откачек на основе выполнения предварительных (разведочных) расчетов по приближенным значениям параметров, а в процессе проведения откачек — на основе анализа выявляемых зависимостей:

$$S = f(t),\ S = f(\lg t),\ S = f[\lg(t/r^2)],\ S = f(\lg r),\ Q = f(t),\ \text{др.}$$

Конструктивные особенности возмущающих и наблюдательных скважин должны по возможности исключать влияние различных технических факторов (несовершенство вскрытия пласта, изменения призабойной зоны, емкость и инерционность скважин) на выявляемые в процессе опытов закономерности изменения уровня. Опытные скважины должны быть совершенными по степени и характеру вскрытия горизонтов, а ближайшие наблюдательные скважины — как правило, расположенными на расстояниях, превышающих мощность опробуемого пласта. В условиях откачки из горизонтов небольшой мощности (до 20 м) целесообразно стремиться к оборудованию совершенных опытных кустов, в которых опытные и наблюдательные скважины вскрывали бы водоносный горизонт полностью и закреплялись фильтрами со скважностью 10–20%. Особенно это важно при опробовании сложнослоистых толщ, обладающих существенной анизотропией. В пластах значительной мощности скважины куста могут быть несовершенными, но при этом необходимо стремиться к тому, чтобы поперечные оси фильтров опытных и наблюдательных скважин находились в одной плоскости (параллельной или совпадающей с осевой плоскостью опробуемого водоносного горизонта). Это обеспечивает исключение ошибок, вызываемых вертикальной анизотропией разреза. Наблюдательные скважины при этом должны обладать незначительной инерционностью (малая емкость скважин, незначительные сопротивления фильтра и призабойной зоны), которая оценивается с помощью экспресс-на-

ливов (учет инерционности необязателен при $t = (15 \div 20)\ \omega_c/T$, где ω_c — поперечное сечение наблюдательной скважины).

Диаметры фильтровых колонн возмущающих скважин и глубина скважин должны обеспечивать размещение в них намечаемого для проведения откачки водоподъемного оборудования, а диаметры наблюдательных скважин — намечаемого для замеров оборудования и возможность проведения пробных откачек. Оборудование скважин опытного куста должно обеспечивать замеры и регулирование дебита при откачке (расходомеры, водомеры, счетчики и др.), снятие с необходимой частотой информации о положении уровня воды во всех скважинах, отбор проб воды для анализов, отвод откачиваемой воды на необходимое расстояние и удовлетворять другим требованиям технологии проведения откачек.

В процессе проведения опытных откачек выполняется их текущая камеральная обработка и составляется следующая полевая документация: 1) журнал откачки; 2) хронологические графики зависимости дебита и понижения уровня в центральной и наблюдательных скважинах от времени: $Q = f(t)$, $S_0 = f(t)$, $S_H = f(t)$, графики зависимости дебита и удельного дебита от понижения уровня: $Q = f(S)$ и $q = f(S)$; графики $S = f(lgt)$, $S = f[lg(t/r^2)]$, $S = f(lgr)$.

Хронологические графики следует составлять в таком масштабе, чтобы по ним можно было легко установить режим движения подземных вод. Поэтому целесообразно применять искаженный вертикальный масштаб. Наиболее нагляден вертикальный масштаб 1 см на графике — 10 см в натуре. При больших абсолютных значениях понижений уровня построение можно начинать с условного нуля.

Построение во время опыта хронологических графиков, особенно $S = f[lg(t/r^2)]$ и $S = f(lgt)$, по всем точкам наблюдений обеспечивает надежный контроль за качеством и правильностью проведения опыта, служит основой для регулирования частоты и системы наблюдений и дает основание для своевременного прекращения откачки.

После окончания опытных откачек во всех скважинах обязательны наблюдения за восстановлением динамического уровня с построением всех необходимых хронологических графиков.

3.2.4. Методика организации и проведения опытных нагнетаний и наливов в скважины и шурфы

Опытные нагнетания и наливы в скважины проводят для изучения и оценки водопроницаемости обводненных пород в условиях, затрудняющих организацию откачек (глубокое залегание подземных вод, слабая водоотдача,

невозможность обеспечения ощутимых понижений уровня и т. д.), а также при изучении фильтрационных свойств слабообводненных и необводненных пород зоны аэрации. Для оценки фильтрационных свойств верхней части зоны аэрации (до глубин не более 5 м) применяют также наливы в шурфы.

Под опытными нагнетаниями следует понимать опыты, при которых осуществляется фильтрация воды при избыточном напоре над верхней границей опробуемого интервала. Если в процессе опыта уровень воды поддерживается в пределах толщи опробуемых горных пород, то это отвечает понятию опытного налива.

Сравнительная простота и стандартизация условий проведения опытных наливов и нагнетаний в скважины обусловили достаточно широкое использование этих методов для оценки водопроницаемости как обводненных, так и необводненных горных пород, особенно при изысканиях для целей гидротехнического строительства. При гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях опытные нагнетания и наливы широко применяются для определения водопроницаемости и удельного водопоглощения трещиноватых скальных пород; выявления необходимости цементации скального основания под инженерным сооружением; опробования трещиноватых пород при выборе вариантов оснований для проектируемых сооружений; проверки качества цементации скальных пород.

Опытные нагнетания – основной метод оценки водопроводимости неводоносных трещиноватых скальных и полускальных пород, так как в этих породах можно относительно просто и надежно изолировать опробуемый интервал скважины от остальной части ствола и сохранить требуемое качество изоляции даже при значительном напоре. Схема установки для нагнетаний показана на рисунке 3.9.

Опытные наливы рекомендуется применять главным образом в рыхлосвязных и трещиноватых породах зоны выветривания, относительная проницаемость которых характеризуется высоким удельным водопоглощением (где трудно обеспечить необходимую изоляцию опробуемого интервала скважины или невозможно создать избыточный напор).

Обычно нагнетания и наливы проводятся при отсутствии наблюдательных скважин. Однако в целях получения более точных показателей желательно иметь хотя бы одну контрольную скважину, в которой можно было бы регистрировать появление воды в процессе опыта.

Режим фильтрации в процессе опытов может быть установившимся, если опыт ведется с постоянным напором (или расходом) до стабилизации расхода (или напора), или неустановившимся, если опыт идет при постоянном расходе

($Q = const$) или напоре ($H = const$). Это и определяет выбор соответствующих расчетных схем и формул.

Наливы и нагнетания в водоносные породы. При наливах и нагнетаниях в водоносные породы для расчетов параметров можно применять те же формулы, что и при откачках, с учетом конструктивных особенностей, степени несовершенства опытных скважин и расчетной схемы опыта. Наиболее часто для расчетов применяются аналитические зависимости, полученные для условий установившейся или неустановившейся фильтрации подземных вод в процессе откачек. При этом в расчетных формулах вместо понижений уровня учитываются соответствующие повышения уровня в центральной и наблюдательных скважинах.

Методика обработки результатов опыта в таких случаях мало отличается от изложенной ранее применительно к откачкам. Например, при опытном наливе (нагнетании) воды в напорный водоносный горизонт в условиях стационарной или квазистационарной фильтрации его водопроводимость может быть определена либо на основе сопоставления повышений уровня в двух точках на один момент времени по формуле (3.17), либо по данным о повышении уровня в одной точке (опытная или наблюдательная скважина) на два момента времени и t_1 и t_2 по формуле (3.16), и т. д. Однако в условиях нагнетания более часто, чем при откачках, возникает необходимость учета потерь напора в трубах, а также некоторых других факторов, искажающих результаты опыта (температура и качество нагнетаемой воды, возможность проявления нелинейности, явления кольматации, гидроразрыва и др.).

Опытные нагнетания в скальные и полускальные породы позволяют оценить не только водопроницаемость, но и их относительную трещиноватость, условной характеристикой которых является удельное водопоглощение q', под которым понимают количество воды в литрах, поглощенной породой в минуту на 1 м длины опробуемого интервала скважины при напоре, равном 1 м. Удельное водопоглощение характеризует водопроницаемость и относительную трещиноватость пород данного интервала в среднем, так как может быть результатом наличия как многочисленных тонких трещин, пор и каверн, так и одной крупной трещины или полости.

Опытные нагнетания осуществляют обычно поинтервально (стандартный интервал 5 м) при нескольких ступенях напора. По построенным в результате опыта графикам зависимости расхода и напора от времени определяют величины установившегося напора и расхода для каждой ступени напора и вычисляют величины приведенных расходов q_0 (л/мин. на 1 пог. м) путем деления установившегося расхода (л/мин.) на длину интервала (м). Графики приве-

денных расходов $q_0 = f(H)$ служат для контроля правильности проведения опыта и являются основой для определения удельного водопоглощения. Аналогично кривым дебита при откачках эти графики могут иметь прямолинейный и криволинейный (параболический, степенной) характер.

Установленное в результате опытов удельное водопоглощение q' используется для сопоставительной характеристики водопроницаемости опробованных отложений, выделения наиболее и наименее проницаемых зон и ориентировочной оценки фильтрационных свойств. В последнем случае используется следующая формула:

$$K = 0{,}525q' \lg\left(\frac{al}{r_c}\right), \qquad (3.29)$$

где a — коэффициент, принимаемый равным 0,66, если опробуемый интервал длиной l отстоит от ближайшего водоупора на расстоянии, не меньшем, чем интервал опробования, и 1,32 — при примыкании опробуемого интервала к одному из водоупоров.

Сочетая опытные нагнетания и наливы в водоносных отложениях с откачками, можно использовать результаты массовых нагнетаний для уточнения водопроницаемости пород в плане и в разрезе, более обоснованно интерполируя и экстраполируя значения параметров, установленные при откачках, на участки, опробованные более быстрым и дешевым способом (с помощью наливов и нагнетаний).

Наливы и нагнетания в необводненные породы. Опытные нагнетания и наливы воды в скважины — пока практически единственный метод, позволяющий расчленить по водопроницаемости неводоносные породы, залегающие на глубинах, где исключается проведение опытных наливов в шурфы. Однако часто эти опыты не дают возможности с необходимой точностью определить коэффициент фильтрации опробованных пород, так как при нагнетании воды в необводненные трещиноватые породы фильтрация носит резко выраженный избирательный характер вследствие действия гравитационных сил. Поэтому коэффициенты фильтрации и удельные водопоглощения, определенные нагнетаниями в водоносных трещиноватых породах, по сути дела мало сопоставимы с этими же показателями водопроницаемости неводоносных пород. При опытных нагнетаниях воды в необводненные породы возникают дополнительные трудности как в технике проведения опытов, так и в обработке полученных материалов. Очистка трещин, пор, каверн и прочих полостей породы от бурового шлама в необводненных интервалах скважин значительно сложнее и менее надежна, чем в обводненных, так как применяемая

для этого обратная промывка интервала до осветления воды не гарантирует хорошего качества очистки. Чтобы уменьшить кольматацию полостей породы, желательно скважины, опробуемые опытными нагнетаниями, особенно в интервалах, расположенных выше уровня подземных вод, бурить с обратной промывкой.

Нагнетание в необводненные породы требует значительно большего времени для того, чтобы получить установившийся расход при данном напоре, чем нагнетание в водоносные породы. Поэтому методы, основанные на использовании зависимостей неустановившегося режима фильтрации, являются в данных условиях перспективными. Определение действующего напора при нагнетании в необводненные породы условно: величина напора H находится в пределах $H_1 < H < H_2$, где H_1 — превышение уровня воды в скважине во время опыта над верхней границей опробуемого интервала, а H_2 — то же, над уровнем подземных вод или подстилающего водоупора. В практике гидрогеологических исследований при вычислении удельного водопоглощения условно принято отсчитывать напор от середины опробуемого интервала.

Опытные нагнетания и наливы могут проводиться при установившемся и неустановившемся режимах фильтрации. Вблизи опытной скважины при нагнетаниях возникает напорная или напорно-безнапорная фильтрация, а при наливах — только безнапорная.

Методика послойного определения фильтрационных свойств необводненных горных пород по результатам нагнетаний в скважины в условиях неустановившейся фильтрации (нагнетание с постоянным расходом или напором) разработана Н.Н. Вериги ным. Для осуществления опытов по этой методике в скважинах необходимо обеспечить напоры, в 10–12 раз превышающие длину испытуемого интервала (что позволяет не учитывать влияния гравитационных сил, но вместе с тем требует тщательной обсадки ствола скважины и ликвидации затрубных пространств).

Нагнетания в скважину. При нагнетании воды в сухие породы через скважину с постоянным расходом происходит изменение уровней образующегося местного потока. Наблюдения за положением уровня являются исходными данными для расчетов параметров. По данным о положении пьезометрического уровня воды в центральной и наблюдательных скважинах можно определить коэффициенты фильтрации K и активной пористости m следующим методом.

$$K = \frac{0{,}183Q}{m(h_2 - h_1)} \lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right). \qquad (3.30)$$

При наличии двух замеров уровня воды h_1 и h_2 над кровлей водоносного горизонта в центральной скважине, соответствующих моментам времени, и t_2 (время отсчитывается от начала опыта — в сутках), используются следующие расчетные формулы: для определения коэффициента фильтрации для определения активной пористости

$$\lg\mu = \lg\frac{Qt_1}{\pi m r_c^2} - d\lg\left(\frac{t_2}{t_1}\right), \tag{3.31}$$

где $d = \dfrac{h_1 + 0{,}5m}{h_2 - h_1}$.

При наличии наблюдательной скважины, в которой фиксируется время появления воды от начала опыта t_n, расчеты параметров ведутся соответственно по формулам:

$$K = \frac{0{,}366Q}{(h_n + 0{,}5m)}\lg\left(\frac{r}{r_c}\right) \text{ и } \mu = \frac{Qt_n}{\pi m\left(r^2 - r_c^2\right)}, \tag{3.29}$$

где H_n — столб воды в центральной скважине в момент появления воды в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии r от центральной.

Наливы в скважину. При наливах в совершенную скважину, заложенную в неводоносные песчаные отложения, для определения параметров используются данные о развитии образующейся от налива воронки в условиях квазистационарного режима. Помимо центральной опытный куст должен включать несколько наблюдательных скважин, располагаемых по лучам на расстояниях от 3 до 10–15 м и используемых для прослеживания образующейся *воронки* (рис. 3.24). Постоянный в процессе опыта расход налива устанавливается ориентировочно по формуле $Q = 0{,}6Khc^2$, где h_c — высота столба воды в скважине, задаваемая в зависимости от мощности опробуемых отложений. Наиболее достоверно коэффициент фильтрации определяется на основе сопоставления одновременно замеренных повышений уровня по двум пьезометрам, расположенным на расстояниях r_1 и r_2 от опытной скважины:

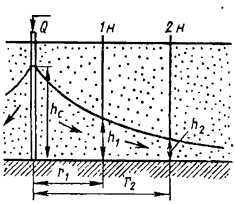


Рис. 3.24. Схема опытного налива воды в скважину

$$K = \frac{0,732Q}{h_1^2 - h_2^2} \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.33)$$

Формула (3.33) справедлива в зоне $r \leq 0,3r_t$, где r_t — радиус растекания, определяемый выражением

$$r_t = 1,14\sqrt{\frac{KQt}{\mu^2}}.$$

При наличии нескольких наблюдательных скважин справедливость формулы (3.33) устанавливается построением графика $h^2f(lgr)$, который должен быть прямолинейным.

При одиночном наливе или наличии только одной наблюдательной скважины коэффициент фильтрации определяется на основе сопоставления двух значений повышения уровня h_1 и h_2, определяемых в одной и той же точке на время t_1 и t_2 от начала опыта по формуле:

$$K = \frac{0,366Q}{h_1^2 - h_2^2} \lg \frac{t_2}{t_1}. \quad (3.34)$$

Выбор моментов времени t_1 и t_2 для расчета по формуле (3.34) осуществляется на основе предварительно составляемого графика $h^2 = f(lgt)$, который должен быть прямолинейным (берутся две любые точки с этого графика с их координатами $h_1\ t_1\ h_2\ t_2$). Для повышения достоверности определения K этим методом опыты необходимо повторять до совпадения результатов. Если подстилающий песчаные породы пласт является полупроницаемым (суглинистым или глинистым), то его водопроницаемость может быть также определена графоаналитическим методом по данным о снижении уровня после налива по наблюдательным скважинам. Изложенная методика справедлива также и для опытных наливов в котлованы круглой формы.

Опытные нагнетания воздуха. В последнее время при изучении фильтрационных свойств необводненных пород практикуются нагнетания в изолированный интервал скважины не воды, а воздуха.

Сущность опытов сводится к обеспечению подачи определенного количества воздуха через бурильные трубы в испытуемый интервал и осуществлению наблюдений за распространением нагнетаемого воздуха в пласте через систему наблюдательных скважин. В процессе опыта фиксируются расход воздуха и его физические параметры по центральной скважине, а также давление воздуха и его температура по всем точкам наблюдения. Опыт проводится

на несколько (обычно на три) ступеней расхода с поддержанием его постоянства на каждой из ступеней. Для осуществления опыта применяется специальное оборудование, обеспечивающее изоляцию испытуемого интервала (тампонирующее устройство), подачу воздуха в пусковую скважину и управление режимом опыта (блок-пульт или распределительное устройство), систему замеров основных параметров в процессе опыта (блок регистрации и разжатия тампонов). Продолжительность опыта на каждой ступени составляет в среднем 2–4 ч. при относительной стабилизации расхода воздуха в интервале пусковой скважины в течение 1–1,5 ч. Испытания ведутся по схеме «снизу – вверх» или «сверху – вниз».

На основе обработки результатов опытных нагнетаний воздуха и учета перехода от характеристик воздуха к воде определяются такие параметры, как коэффициенты фильтрации и пьезопроводности, величина активной пористости (пустотности) пород, фильтрационная анизотропия. Метод применяется при исследованиях для гидротехнического строительства, однако он требует дальнейшей разработки и более широкой практической проверки.

Опытные наливы в шурфы. Наиболее распространенным и разработанным методом изучения фильтрационных свойств связных и рыхлых пород зоны аэрации являются опытные наливы в шурфы, которые обеспечивают фильтрационное опробование пород на глубину до 5 м (при ярусном проведении опытов на глубину до 10–15 м).

Сущность опытов заключается в наблюдениях за ходом инфильтрации воды из шурфов и снятии характеристик инфильтрационного потока в условиях постоянного уровня воды в шурфе в процессе опыта. Метод инфильтрации воды из шурфов, предложенный впервые А. К. Болдыревым, применяется сейчас в различных модификациях (по Н. С. Нестерову, Н. К. Гиринскому, Н. Н. Биндеману и др.). В процессе опыта смыкание инфильтрующейся воды с грунтовым потоком должно быть исключено, и, следовательно, опыты по наливам воды в шурфы осуществляются при глубине залегания уровня подземных вод не менее 4–5 м. В таких условиях основными действующими силами при инфильтрации воды из шурфа являются гидростатический напор слоя воды и капиллярное давление, совпадающее по направлению с инфильтрацией и проявляющееся в капиллярном всасывании воды. Особенно существенно влияние капиллярного всасывания на инфильтрацию воды в суглинистых и глинистых породах и несущественно в хорошо проницаемых породах (песках и супесях). Проведение опыта может осложняться боковым растеканием инфильтрационного потока, влиянием защемленного в породах воздуха, неоднородностью строения зоны аэрации.

Влияние бокового растекания может учитываться, не учитываться или частично исключаться в процессе опыта. Влияние защемленного воздуха может быть оценено по формуле С. Ф. Аверьянова, устанавливающей связь между коэффициентом водопроницаемости пород K_W при влажности их W и коэффициентом фильтрации пород K в условиях их полного насыщения:

$$K_W = K\left(\frac{W-W_0}{n-W_0}\right)^{3,5}. \qquad (3.35)$$

где W_0 — максимальная молекулярная влагоемкость, n — пористость пород в долях единицы.

В наиболее простых условиях скорость вертикального просачивания воды при наливах через зону аэрации выражается следующим уравнением:

$$\upsilon = K\frac{Z+h_{к+l}}{l} = K\left(1+\frac{Z+h_к}{l}\right), \qquad (3.36)$$

где $h_к$ — капиллярное давление, развивающееся при инфильтрации; Z — толщина слоя воды в шурфе; l — глубина просачивания воды; $(Z + h_к + l)/l$ — действующий напорный градиент (рис. 3.26).

В основном все практикуемые методы определения водопроницаемости по данным инфильтрации воды из шурфа, кроме метода Н. Н. Биндемана, основаны на расчетах по формулам установившейся фильтрации.

Способ А. К. Болдырева. В испытуемой породе до заданной глубины отрывается шурф, у бровки которого устанавливаются два бака, поочередно наполняемые водой в ходе опыта. Из баков по опущенной вниз трубке подается на дно шурфа вода с интенсивностью, обеспечивающей постоянный слой воды высотой около 10 см. Толщина слоя воды в шурфе контролируется по мерной рейке (рис. 3.25). Опыт ведется до стабилизации расхода воды из шурфа.

Расход воды Q через площадь поперечного сечения фильтрующей породы ω определяется формулой $Q = v\omega = KI\omega$, откуда, принимая, что в процессе длительной инфильтрации напорный градиент будет близким к единице, можно определить коэффициент фильтрации при известном расходе потока Q как скорость фильтрации при напорном градиенте, равном единице:

$$K = v = Q/\omega. \qquad (3.37)$$

При определении коэффициента фильтрации по формуле (3.37) действительно можно принимать напорный градиент близким к единице, так как величина l намного больше $(Z + h_к)$, и, следовательно, $I = (l + Z + h_к)/l \approx 1$. Однако при этом не учитывается действие капиллярных сил, а также боковое расте-

кание потока, поэтому способом Болдырева допустимо пользоваться для приближенного определения коэффициента фильтрации в песчаных и трещиноватых породах, где влияние капиллярных сил и бокового растекания невелико.

Способ Н. С. Нестерова. Для того чтобы уменьшить влияние бокового растекания, Н. С. Нестеров предложил на спланированное дно шурфа устанавливать концентрично два стальных цилиндра разного диаметра, вдавливая их на глубину 5–10 см (рис. 3.27). В оба цилиндра наливается вода (высота слоя 2–10 см) и в процессе всего опыта поддерживается на одном и том же уровне с помощью двух сосудов Мариотта, наполненных водой. Опыт ведется до стабилизации расхода воды через внутреннее кольцо прибора во времени.

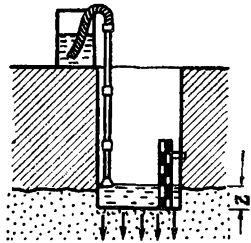


Рис. 3.25. Схема опытной инфильтрации воды из шурфа по способу А. К. Болдырева

Допускается, что вода из кольцевого промежутка, образованного внешним и внутренним цилиндрическими кольцами, расходуется на просачивание, боковое растекание и капиллярное всасывание. Вода, заполняющая внутренний цилиндр, расходуется главным образом на инфильтрацию в вертикальном направлении, что позволяет приближенно принимать поперечное сечение инфильтрационного потока равным поперечному сечению внутреннего цилиндра.

Для определения глубины просачивания бурятся две скважины небольшого диаметра: одна — на расстоянии 34 см от стенки шурфа до опыта и другая — в центре внутреннего кольца по окончании опыта. Глубина просачивания устанавливается по величине влажности породы. Вычисление коэффициента фильтрации ведется по формуле:

$$K = \frac{Ql}{\omega(h_K + Z + l)},$$

где Q — установившийся фильтрационный расход через внутреннее кольцо прибора; h_K — капиллярное давление, принимаемое равным 50% от максимальной высоты капиллярного поднятия (для суглинков это 0,8–1 м, для супесей — 0,4–0,6, для песков — от 0,3 до 0,5 м в зависимости от их зернистости.

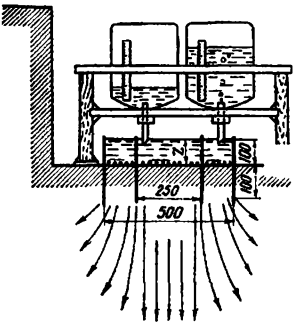


Рис. 3.26. Схема установки для опытов по инфильтрации из шурфа по способу Н. С. Нестерова (цифрами даны размеры установки в мм)

Способ Нестерова дает лучшие результаты в слабопроницаемых породах, особенно в покровных суглинках и лессах. К недостаткам способа относятся приближенный учет капиллярного растекания и длительность проведения опытов.

Способ Н. К. Гиринского основан на гидромеханическом решении для стационарного осесимметричного потока, учитывает растекание инфильтрационного потока, силы капиллярного всасывания и влияние защемленного воздуха, остающегося в порах пород, насыщаемых при инфильтрации. В шурф, пройденный на необходимую глубину, через полый цилиндр, вдавливаемый в его дно на 1–2 см, наливают воду. Диаметр цилиндра принимается от 35 до 50 см, что упрощает последующие расчеты. Подача воды в цилиндр и поддержание в нем постоянного уровня осуществляется с помощью предложенного Е. В. Симоновым автоматического регулятора.

В процессе опыта ведется учет расхода воды на инфильтрацию [для контроля опыта строится график $Q = f(t)$]. По достижении стабилизации расхода (отклонение от среднего расхода не более 10% в течение 2–3 ч.) опыт прекращается. Длительность опыта в мелкозернистых песках и супесях 5–10 ч., в глинистых породах больше.

Значение коэффициента фильтрации K (м/сут.) определяется в зависимости от величины установившегося расхода воды Q (л/мин.) и условий проведения опыта по формуле

$$K = a\zeta Q, \tag{3.39}$$

где a — коэффициент, зависящий от глубины вдавливания кольца в породы l_0 и диаметра кольца d (при l_0/d до 0,03 значение a = 1,06; при l_0/d = 0,04 a = 1,08 и при l_0/d = 0,05 a = 1,1); ζ — коэффициент, величина которого зависит от значения $(h_к + Z)$ и диаметра кольца (здесь Z — слой воды в кольце, см) и принимается по справочникам.

Метод Н. К. Гиринского целесообразно применять для определения коэффициента фильтрации песчаных и суглинистых пород.

Все рассмотренные способы определения водопроницаемости основаны на расчетах по формулам установившейся фильтрации. Однако результаты опытов по инфильтрации из шурфов могут обрабатываться и по формулам неустановившейся фильтрации, что позволяет существенно сократить их продолжительность.

Способ Н. Н. Биндемана. Н. Н. Биндеман предложил обрабатывать опыты, выполняемые по способу Нестерова, на основе наблюдений за ходом инфильтрации воды во времени, ведя расчеты по следующей формуле:

$$K = \beta V / \omega t, \tag{3.40}$$

где V — объем воды, израсходованной за время t от начала опыта; β — коэффициент, величина которого зависит от l/Z и определяется выражением $\beta = 1 - [(Z + h_к)/l]\ln[1 + l/(Z + h_к)]$.

Способ Н. Н. Биндемана удобен, прост и не требует длительного проведения опыта (стабилизация расхода воды во времени не обязательна); он дает возможность неоднократно определять параметры по результатам одного опыта (определение осуществляется для разных значений t и t_1), показывает достаточно точные результаты и особенно эффективен при проведении опытов в слабопроницаемых породах. Наряду с водопроницаемостью можно определять величину капиллярного давления $h_к$ (по вспомогательным графикам) и недостаток насыщения μ (по отношению объема воды V, поступившей в породы из внутреннего кольца, к объему увлажненных ею пород ωl, т. е. $\mu = V/\omega l$).

Возможен также и графоаналитический способ обработки опытных данных, основанный на непосредственном использовании уравнения (3.36) для скорости вертикального просачивания. Для этого глубина просачивания l выражается через объем инфильтрующейся воды V ($l = V/\mu\omega$ т. к. $V = \mu\omega l$) и уравнение (3.36) приводится к виду

$$v = K + \frac{K\mu\omega(Z + h_к)}{V}. \tag{3.41}$$

Как видно из уравнения (3.41), скорость инфильтрации v линейно связана с величиной $1/V$ (здесь V — объем просочившейся воды), поэтому если опытные данные по инфильтрации воды из шурфа наносить на график зависимости v от $1/V$, то точки должны ложиться на прямую линию, отсекающую на оси v расчетную величину коэффициента фильтрации K и имеющую угловой коэффициент $C = K\mu\omega(Z + h_к)$. По значению углового коэффициента легко определить величину капиллярного давления $h_к$ (в данном случае $h_к = C/K\mu\omega - Z$).

Линейный характер, как это видно из уравнения (3.41), имеет и зависимость $vV = K\mu\omega(Z + h_к + KV$. Поэтому представление опытных данных в координатах $vV - V$ также должно давать прямую линию, отсекающую на оси vV отрезок $A = K\mu\omega(Z + h_к)$ и имеющую угловой коэффициент, численно равный коэффициенту фильтрации K. По характеру графиков $vV = f(V)$ можно судить, таким образом, о характере изменения проницаемости пород с глубиной.

Все изложенные методы предполагают однородность строения зоны, через которую осуществляется инфильтрация воды из шурфа. Наличие в этой зоне слоев более высокой или более низкой проницаемости может предопределить недостоверность результатов опыта. Поэтому при постановке опытов по инфильтрации необходимо иметь четкое представление о литологическом строении зоны аэрации, положении в разрезе относительных водоупоров или хорошо дренирующих слоев и глубине залегания подземных вод. Это позволит обоснованно выбрать схему проведения опыта, его продолжительность, методику обработки результатов опыта и их правильную интерпретацию.

Изучение фильтрационных свойств кусочнооднородных в разрезе толщ возможно путем поинтервального опробования различных в литологическом отношении слоев с помощью экспресс-наливов ограниченной продолжительности (исходя из объема воды на инфильтрацию V_{min}). В процессе таких мгновенных наливов ведутся наблюдения за снижением уровня воды в кольце во времени (фиксируется прохождение уровня через определенные отметки маркированной рейки). Результаты наблюдений представляются в виде графика $vs = f(s)$, который должен быть прямолинейным в соответствии с исходной зависимостью $vs = K\mu(z + h_к) + (1 - \mu) \cdot Ks$, где v и s — соответственно скорость снижения и величина понижения уровня воды в кольце прибора. Угловой коэффициент такого прямолинейного графика численно равен $C = (1 - \mu) \cdot K$. Поэтому, принимая в среднем для покровных отложений $\mu = 0{,}1$, можно с погрешностью не более 10% определять коэффициент фильтрации из выражения $K = C/0{,}9$, где C — угловой коэффициент графика

$$vs = f(s).$$

Изучение инфильтрационных свойств анизотропных отложений возможно при сочетании опытных наливов в шурфы с лабораторными методами определения коэффициента фильтрации. На основе лабораторных определений коэффициента фильтрации опробуемых пород в горизонтальном $K_г$ и вертикальном $K_в$ направлениях устанавливается степень их анизотропии $\lambda^2 = K_в.K_г$, а при известных значениях λ и достоверной величине коэффици-

ента инфильтрации пород в вертикальном направлении $K_в$, определенной с помощью наливов воды в шурфы, можно определять достоверное значение коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении $Kг = Kв/\lambda^2$ или среднее значение коэффициента фильтрации анизотропных пород – $Kср = \sqrt{Kг \cdot Kв} = Kв/\lambda$.

Используя корреляционные связи между результатами определения фильтрационных свойств одних и тех же пород лабораторным путем и полевыми опытно-фильтрационными работами, можно уменьшить объемы более дорогостоящих полевых исследований за счет обоснованной интерполяции и экстраполяции лабораторных определений либо определений, осуществляемых другими вспомогательными методами (экспресс-опробованием, геофизическим и др.).

3.2.5. Экспресс-опробование водоносных горизонтов

Экспресс-опробование водоносных горизонтов, основанное на изучении реакции опробуемых объектов на кратковременное их возмущение, получает все более широкое применение для предварительной оценки фильтрационных свойств и расчленения изучаемого разреза отложений по водопроницаемости как в процессе бурения гидрогеологических скважин (опережающее опробование с помощью специальных установок и комплектов испытательных инструментов), так и после их сооружения (экспресс-откачки, экспресс-наливы, опробование пластов с помощью специальных снарядов и пластоиспытателей, расходометрия, термометрия и др.).

$$K = \frac{0,366Q\left(\lg\frac{1,47l}{\varepsilon r_0} + \zeta_\phi\right)}{lS_p}, \qquad (3.42)$$

где l — длина фильтра-опробователя (обычно 1–2 м); r_0 — его радиус; ε — коэффициент, равный 2 при расположении фильтра у кровли или подошвы пласта и 1 при положении фильтра внутри пласта; S_p — расчетное понижение уровня с учетом потерь напора ΔS — в бурильных трубах ($S_p = S_0 - \Delta S$); ζ_ϕ — показатель сопротивления стандартного фильтра-опробователя (изменяется от 1,5 до 6,5 при коэффициентах фильтрации пород соответственно от 5 до 100 м/сут.). (Схему опережающего опробования горизонта см. на рис. 6.)

При бурении глубоких скважин в устойчивых: породах пласты и горизонты целесообразно опробовать с помощью специальных опробователей и пластоиспытателей, опускаемых в скважины на бурильных трубах или кабеле.

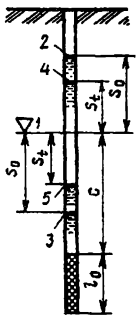


Рис. 3.27. Схема экспресс-опробования несовершенной скважины: 1 — статический уровень; 2, 3 — положение уровня на начало отсчета после налива и после откачки; 4, 5 — положение уровня в расчетный момент времени t в процессе опыта

Экспресс-откачки и экспресс-наливы. Эти экспресс-методы определения параметров, основанные на использовании наблюдений за изменением уровня воды в скважине в результате кратковременного отбора или налива воды, применяются при изучении фильтрационных свойств пород с относительно невысокой водопроницаемостью ($0{,}01 < K < 5$ м/сут.).

В более проницаемых породах восстановление уровней в результате экспресс-возмущения происходит очень быстро, и это ограничивает возможности применения рассматриваемых методов.

Мгновенное снижение уровня воды в опытной скважине (экспресс-откачка) осуществляется быстрым ее отбором (желонкой, включением насоса, открытием задвижки), мгновенный подъем (экспресс-налив) — единовременным наливом воды или погружением под уровень воды какого-либо емкого тела. Общий недостаток экспресс-определений — зависимость искомых параметров от сохранности и состояния призабойной зоны опытных скважин и их малый диапазон действия (при незначительной степени возмущения параметры характеризуют небольшую зону пород вокруг скважины). Достоверность определения параметров может быть повышена за счет массовости экспресс-определений и учета состояния призабойной зоны.

Экспресс-налив (откачка) в несовершенную скважину (рис. 3.27). В условиях квазиустановившейся фильтрации и при отсутствии влияния границ потока для анализа результатов экспресс-наливов (откачек) в несовершенные скважины рекомендуется использовать зависимость вида

$$\ln\frac{S_0}{S_t}=\frac{Kl_p}{\omega}t, \qquad (3.43)$$

где S_0 и S_t – положение уровня по отношению к статическому на начало опыта и через время t; l_p — расчетная длина рабочей части скважины, определяемая в зависимости от ее диаметра и размеров фильтра. Для несовершенной скважины с длиной фильтра l_0 и радиусом r_c $l_p = 2{,}73l_0/lg(0{,}7l_0/r_c)$, а для скважины,

работающей только дном, $l_p = 10r_c$. Из уравнения (3.43) следует, что график зависимости $\ln(So/S_t) = f(t)$ представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом $C = Klp/\omega$, чем и можно воспользоваться при определении коэффициента фильтрации. Сняв с прямолинейной части графика $lg(So/S_t) = f(t)$ величину углового коэффициента C или координаты любой ее точки $lg(So/S_t))$ и t, коэффициент фильтрации определим по формуле:

$$K = 2,3\left(\frac{C\omega}{lp}\right) \text{ или } K = 2,3\left(\frac{\omega}{l_0 t}\right)\lg\left(\frac{S_0}{S_t}\right). \tag{3.44}$$

Аналогичным образом можно обрабатывать и результаты экспресс-откачек. При этом вместо повышений уровня рассматриваются его понижения по отношению к исходному статическому уровню перед опытом.

Для исключения влияния на работу опытных скважин границ пласта в разрезе необходимо заглублять их фильтр под уровень воды не менее чем на полторы его длины, т. е. $C \geq 1,5l_0$ (рис. 3.27).

Экспресс-налив (откачка) в совершенную скважину. Обработка результатов таких опытов возможна на основе приближенной зависимости, определяющей изменение уровня на конечных стадиях опытов:

$$S_t = \frac{V}{4\pi Tt}, \tag{3.45}$$

где S_t — повышение или понижение уровня через время t после опыта; $V = \omega S_0$ — объем воды, прилитой (или отобранной) в процессе возмущения (ω — сечение скважины, S_0 — повышение или понижение уровня воды при экспресс-опробовании).

Обработка опыта может проводиться графоаналитическим способом — построением графика $S_t = f(l/t)$, который, как это видно из уравнения (3.45), представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом $C = V/4\pi T$. Следовательно, по величине C может быть определена водопроводимость $T = V/4\pi C$. В принципе по любой точке прямолинейной части графика $S_t = f(l/t)$ водопроводимость может быть определена по формуле

$$T = \frac{V}{4\pi S_t t} = 0,08\frac{V}{S_t t}. \tag{3.46}$$

Расходометрия скважин. Суть метода заключается в определении и анализе профиля расхода потока по стволу скважины «при наливе, откачке или

в естественных условиях, его применение эффективно и целесообразно в незаглинизированных скважинах. Интерпретация расходограмм осуществляется с учетом того, что осевой поток воды в скважине изменяется лишь в интервалах проницаемых (водоносных) пород, а в пределах водоупоров он остается постоянным (рис. 3.28). Анализ графиков расхода воды по стволу скважины $Q' = f(h)$ позволяет определять глубину залегания, мощность и гидродинамические параметры (водопроницаемость, напоры и др.) проницаемых пород. Границы пластов различной водопроницаемости устанавливаются по точкам перелома расходометрического графика (рис. 3.28, А). Расход воды в интервале проницаемого пласта определяется по разности расходов потока в его кровле и подошве ($Q_i = Q'_v\kappa - Q'_v n$). Характер неоднородности пластов выявляется на основе анализа графиков изменения расхода потока по их мощности; водопроницаемость и напоры каждого из пластов определяются на

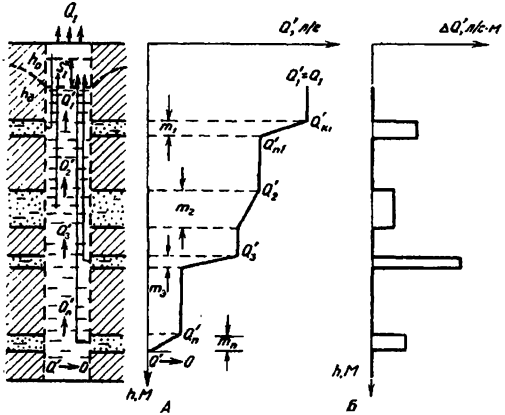


Рис. 3.28. Схема расходометрического исследования скважины при откачке: А — расходограмма $Q' = f(h)$; Б — дифференциальная расходограмма $\Delta Q' = f(h)$); h_o – установившийся общий уровень воды в скважине; $h_д$ – динамический уровень воды в скважине при откачке

основе гидродинамических расчетов, учитывающих «участие» каждого из пластов в формировании общего расхода потока, его пьезометрического уровня, суммарной водопроводимости.

Методика расходометрии гидрогеологических скважин зависит от задач выполняемых исследований, геолого-технических условий объектов и вида применяемой аппаратуры. Детальное ее освещение применимо к решению гидрогеологических задач (расчленение разреза по водопроницаемости, определение фильтрационных свойств и напоров пластов, выявление зон перетока и водопоглощения.

Расходометрия осуществляется в фонтанирующих скважинах, при откачках, наливах и нагнетаниях в условиях установившейся и реже — неустановившейся фильтрации, подземных вод. Для этой цели скважина должна быть соответствующим образом оборудована и подготовлена (посадка фильтра, очистка от шлама, разглинизация, шаблонирование, прокачка, установка оборудования). На рисунке 3.29 для примера показана схема установки расходомера в скважине при опробовании ее откачкой. При дискретных замерах расхода (практикуется наиболее часто) расходомер устанавливают в различных по глубине точках. Шаг установки прибора в зависимости от детальности и глубины исследований составляет 5–10 м при обзорных измерениях и 2–0,1 м при детальных измерениях. В результате обзорных измерений, выполняемых в открытом стволе скважины, выявляются зоны изменения расхода воды и интервалы для детальных измерений.

Детальные измерения проводят с целью уточнения границ и структуры водопритоков отдельных водопроницаемых пластов.

По результатам расходометрии снимается опытная кривая распределения скоростей движения жидкости

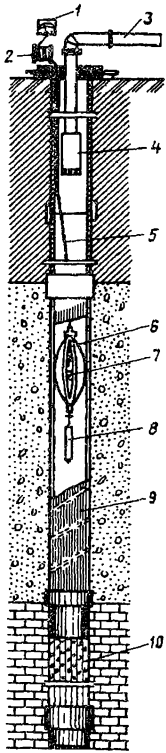


Рис. 3.29. Схема установки расходомера в скважине: 1 — пульт; 2 — лебедка; 3 — водоподъемные трубы; 4 — насос; 5 — кабель; 6 — центральный фонарь; 7 — вертушка; 8 — груз; 9, 10 — фильтры

по стволу скважины, на основе которой строятся дифференциальные кривые изменения входных скоростей или приращения расходов по стволу скважины. По характерным точкам перегиба дифференциальных кривых выделяются интервалы наиболее проницаемых пластов, и определяется приходящийся на эти интервалы расход. На основе сопоставления фактических и теоретических кривых распределения входных скоростей по мощности каждого из выделяемых пластов делается вывод об их однородности, а по соотношению расходов или скоростей по отдельным пластам и суммарной водопроводимости (определяется любым другим методом) оцениваются параметры каждого из пластов.

Необходимо отметить, что применять описанные экспресс-методы следует в комплексе с основными видами опытно-фильтрационных работ и с геофизическими методами исследований. Так, эффективным оказывается сочетание опробования пластов специальными пластоиспытателями и опробователями с геофизическими методами исследований и расходометрией, которое позволяет получать достаточно достоверную информацию о водообильности и фильтрационных свойствах пород в процессе поисково-съемочных работ при существенном сокращении объемов дорогостоящих откачек.

3.2.6. Определение направления и скорости движения подземных вод

Для решения многих задач, связанных с выявлением условий формирования и разрушения месторождений полезных ископаемых (в том числе и подземных вод), миграции в воде различных химических и биологических компонентов, с прогнозами изменения качества подземных вод и подтягивания различных контуров и т. п., необходимо определять направление движения подземных вод, скорость их передвижения, активную пористость и некоторые другие миграционные параметры водоносных пластов и горизонтов. Эти показатели определяются гидрогеологическими и геофизическими методами. Обычно задачи выяснения направления и действительной скорости движения подземных вод решаются совместно, хотя нередко возникает необходимость лишь в определении направления движения подземного потока.

Направление движения подземных вод легко устанавливается при наличии карт гидроизогипс (либо гидроизопьез) по изучаемым водоносным горизонтам. По таким картам направление движения подземных вод определяется линиями токов, проведенными перпендикулярно к линиям равного напора (гидроизогипсам или гидроизопьезам) по уклону потока.

При отсутствии карт, отражающих положение свободной или пьезометрической поверхности подземных вод, для определения направления их движения необходимо иметь (или заложить) не менее трех выработок, чтобы установить отметки уровня подземных вод. Выработки желательно располагать по углам равностороннего треугольника с длиной стороны от 50 до 200 м (чем меньше уклон потока, тем больше расстояние между скважинами). По известным или установленным отметкам уровня подземных вод путем интерполяции составляется план изолиний свободной или пьезометрической поверхности и определяется направление движения потока по линиям токов (рис. 3.30).

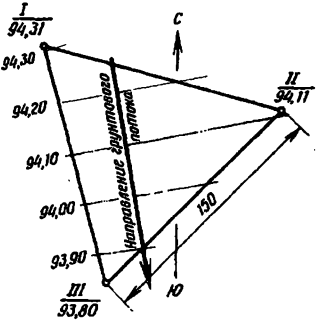


Рис. 3.30. Схема расположения скважин для определения направления движения грунтовых вод

Для получения надежных данных о направлениях движения потоков подземных вод следует использовать материалы режимных наблюдений (карты изолиний на различные периоды времени). Определение направления движения по картам гидроизогипс (гидроизопьез) следует считать основным методом. При отсутствии карт и достоверных данных об отметках уровней в отдельных точках направление движения подземных вод можно устанавливать с помощью геофизических (фотографирование в скважинах конусов распространения красителя от точечного источника, метод заряженного тела, замеры интенсивности конвективного переноса тепла в разных направлениях от датчика, круговые измерения естественного потенциала и др.), радиоиндикаторных и других методов.

Геофизические методы определения направления движения подземных вод детально изложены в специальных руководствах. Наиболее перспективны из них односкважинные методы, в том числе метод фотографирования конусов выноса от точечного источника красителя, при котором периодически фотографируются распространяющиеся от специальной капсулы конуса красители на фоне стрелки магнитного или гидроскопического указателя.

Всего за один спуск можно выполнить до 50 снимков. Направление движения подземных вод определяется по направлению конуса выноса красителя. Для получения надежных результатов достаточно 4–5 снимков.

Точность определения направления подземного потока может быть оценена величиной относительной погрешности от 3 до 20%. В значительной мере погрешность зависит от скорости движения подземных вод. Метод может использоваться при скоростях фильтрации не ниже 0,5 м/сут. По времени существования конуса можно ориентировочно определить и скорость фильтрации v.

Этот метод значительно менее апробирован по сравнению с радиоиндикаторным, описанным ниже, но он несколько проще в исполнении и не требует согласования с органами санэпиднадзора.

Односкважинные методы определения направления движения подземных вод не рекомендуется использовать в породах с редкой и неравномерной трещиноватостью.

Индикаторные методы определения направления и скорости движения подземных вод. Одним из важнейших показателей миграции подземных вод является действительная скорость их движения или фильтрации $v_д$, которая связана со скоростью фильтрации v соотношением $v_д = v/n_a$, где n_a — активная в фильтрационном отношении пористость породы, равная разности между полной пористостью n_0 и объемным содержанием связной воды n_0 и защемленного воздуха $n_з$ (т. е. $n_a = n_0 - n_c - n_з$).

При решении задач тепломассопереноса следует учитывать, что действительная скорость фильтрации, определяющая конвективный перенос вещества и тепла с фильтрационным потоком, может изменяться за счет сорбции солей и растворов, выщелачивания, фильтрационной диффузии, теплового воздействия воды и пород, влияния микроорганизмов и других факторов. При этом вместо активной пористости учитывается эффективная пористость $n_э$, отражающая влияние указанных процессов (и тогда $v_д = v/n_э$).

При наличии карт гидроизогипс (гидроизопьез) и данных о коэффициенте фильтрации и пористости водоносных пород действительная скорость фильтрации $v_д$ может быть определена по значению скорости фильтрации ($v = KI$) с учетом соотношения $v_д = v/n_A$.

Однако более надежным представляется определение действительной скорости движения подземных вод с помощью специальных полевых опытов, среди которых наибольшее практическое применение получили индикаторные методы, основанные на введении в испытуемый горизонт через пусковые скважины каких-либо индикаторов и на определении скорости их передвиже-

ния в условиях подземного потока по времени появления индикаторов в наблюдательных скважинах.

В качестве наиболее часто практикуемых индикаторов используются красящие вещества (флюоресцеин, метиленовый синий, родамин-В, уранин, эритрозин и др.), электролиты (поваренная соль, хлорид аммония, соли лития и др.) и радиоактивные индикаторы (соединения, содержащие ^{131}I, ^{82}Br, ^{3}H, ^{60}Co, ^{51}Cr и др.).

Перед проведением опыта участок работ необходимо хорошо изучить в геолого-гидрогеологическом отношении. В пусковых и наблюдательных скважинах с помощью геофизических исследований, расходометрии, лабораторных работ и поинтервального опробования должны быть выделены, соответствующим образом изучены и при необходимости (при послойном опробовании) изолированы пласты, горизонты или интервалы, подлежащие исследованию.

Наблюдательные скважины для прослеживания передвижения индикатора закладываются ниже по потоку на расстоянии от 0,5 до 2 м в суглинистых и супесчаных породах, от 2 до 8 м в песчаных зернистых породах, от 5 до 15 м в гравийно-галечных и хорошо проницаемых трещиноватых породах и от 15 до 50 м и более в закарстованных породах. Количество наблюдательных скважин может изменяться от одной до трех при расстоянии между ними от 0,5 до 2 м. В принципе возможно определение направления и скорости движения подземных вод и без наблюдательных скважин (односкважинные методы), если для таких определений используются данные наблюдений за изменением концентрации индикатора во времени или за его распространением непосредственно в пусковой скважине (фотографирование конусов распространения красителей, термометрические и радиоиндикаторные замеры и т. д.).

Появление индикатора в наблюдательных скважинах устанавливается химическим, электролитическим и калориметрическим способами, при этом первые два дают наиболее надежные результаты.

При химическом способе появление индикатора устанавливается по изменению его концентрации в периодически отбираемых из наблюдательных скважин пробах воды.

Радиоиндикаторные методы приобретают в последние годы все более широкое применение для определения направления и скорости движения подземных вод, а также для решения многих других практических задач. В качестве индикаторов для мечения воды используются различные радиоизотопы. Контроль за перемещением изотопов ведется по замерам интенсивности излучения и определения их концентрации .

Возможность использования радиоактивных индикаторов низких концентраций, их сравнительно незначительная сорбционная способность и высокая точность определений предопределяют большие перспективы применения радиоиндикаторных методов для решения гидрогеологических задач и, в частности, для определения направления и скорости движения подземных вод. Наибольшее применение в качестве индикаторов находят соединения, содержащие ^{131}I,^{82}Br, ^{3}H, ^{51}Cr, ^{60}Co, ^{86}Rb, ^{35}S, ^{24}Na и др.

Радиоиндикаторные методы применяются в различных вариантах и модификациях (односкважинные и с наблюдательными скважинами, одноиндикаторные и двухиндикаторные и др.).

Суть односкважинного радиоиндикаторного метода заключается в проведении наблюдений за изменением во времени концентрации введенного в скважину радиоактивного индикатора. Изменения концентрации индикатора во времени и эпюры распределения его активности, получаемые с помощью зонда, опускаемого в скважину, являются основанием для определения расхода, скорости и направления движения потока подземных вод. Особенно эффективным является этот метод при импульсном введении радиоиндикатора.

Радиоиндикаторные методы с наблюдательными скважинами в методическом отношении аналогичны описанным выше: фиксируется появление индикатора в наблюдательной скважине, и время его передвижения от пусковой до контрольной точки используется для определения действительной скорости фильтрации.

Раздел 4. ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ РЕЖИМА И БАЛАНСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучению режима и баланса подземных вод отводится существенная роль и значение в общем комплексе гидрогеологических исследований, выполняемых при решении самых разнообразных народнохозяйственных задач.

Стационарные гидрогеологические наблюдения с целью изучения режима и баланса подземных вод позволяют дать количественную характеристику процессов формирования подземных вод, выявить основные закономерности пространственно-временного изменения их количества, качества и свойств и использовать эти закономерности для обоснования путей наиболее рационального освоения и охраны подземных вод, состава мероприятий по борьбе с их вредным воздействием и способов управления их режимом.

Роль и значение этих исследований будут увеличиваться в дальнейшем по мере роста гидрогеологической изученности территории, развития сети режимных наблюдений и совершенствования методов использования результатов стационарных наблюдений для выполнения различного рода гидрогеологических прогнозов. Со временем изучение режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях будет главным, а нередко и единственным видом полевых гидрогеологических исследований.

Данные наблюдений за режимом и балансом подземных вод будут обеспечивать не только высокую достоверность и обоснованность выполняемых инженерных прогнозов, но и значительное повышение экономической эффективности гидрогеологических исследований и изысканий.

Глава 4.1. РЕЖИМ И БАЛАНС ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

Под режимом подземных вод понимают изменения в пространстве и во времени ресурсов, свойств и состава подземных вод (включая уровни, расходы, скорости, температуру, химический, газовый, и бактериологический составы), отражающие процесс их формирования. Цель наблюдений за режимом — установление объективных законов явлений, имеющих место при формировании

подземных вод, их объяснение и использование для обоснования различного рода гидрогеологических прогнозов.

Режим подземных вод в зависимости от характера определяющих его явлений и факторов может быть естественным (формируется под действием комплекса естественных факторов — геологических, климатических, гидрологических, биолого-почвенных, космогенных и др.), нарушенным (обусловлен главным образом влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека) и слабонарушенным, формирующимся при совместном воздействии искусственных и естественных факторов, но при преимущественном влиянии последних.

На большей части территории России имеют место естественный и слабонарушенный режимы подземных вод. Нарушенный режим характерен для отдельных участков, где решающим фактором в создании режима подземных вод является инженерная деятельность человека (орошение, осушение, гидротехническое строительство, действие водозаборных и дренажных сооружений и т. п.). В этой связи исследования режима подземных вод могут быть подразделены на региональные, направленные на выявление общих региональных закономерностей формирования режима подземных вод (главным образом под действием естественных режимообразующих факторов), и локальные (специализированные), направленные на изучение особенностей режима подземных вод, формирующегося под влиянием местных факторов (литологического состава пород, гидрологического режима рек и водоемов, глубины залегания подземных вод, дренированности территории и инженерной деятельности человека).

Изучение режима подземных вод позволяет определять: 1) необходимые для прогнозов естественного или нарушенного режимов связи и зависимости элементов режима от природных и искусственных факторов (или их совокупности); 2) отдельные элементы водного баланса, используемые при обосновании водохозяйственных мероприятий и воднобалансовых расчетах; 3) характер и степень влияния инженерной деятельности человека на подземные воды и связанные с изменением их режима явления и процессы (для обоснования наиболее рациональных путей управления режимом подземных вод, их народнохозяйственного использования и охраны); 4) особенности расчетных схем и значения расчетных гидрогеологических параметров, необходимые для различных прогнозов и обоснований.

Под балансом подземных вод понимается соотношение между их поступлением (приходная часть) и расходованием (расходная часть) в количе-

ственном выражении (в 0,1 миллиметре слоя воды) на той или иной площади за определенный период.

Режим и баланс подземных вод взаимосвязаны. Они характеризуют один и тот же процесс — формирование подземных вод. Водный баланс, обусловленный влиянием естественных (осадки, испарение, транспирация, конденсация, подземный и поверхностный сток) и искусственных (орошение, потери воды из каналов и систем водоснабжения, подпор, дренаж, агромелиоративные мероприятия и др.) факторов, предопределяет генетические основы, направленность и характер режима подземных вод. Поэтому изучение элементов водного балансов и выявление основных ведущих его показателей создает основу для научного познания и управления режимом подземных вод. В свою очередь анализ режима подземных вод позволяет проводить количественное определение отдельных элементов водного баланса (инфильтрации, испарения, подземного стока) и дает возможность выполнять более обоснованно водно-балансовые расчеты.

Задачи изучения режима и баланса подземных вод многообразны. Так, изучение естественного режима подземных вод осуществляется в целях обеспечения решения следующих задач: 1) выявления условий формирования подземных вод (оценка питания, разгрузки и роли отдельных режимообразующих факторов и процессов, определение элементов водного баланса); 2) изучения закономерностей изменения во времени естественного питания подземных вод); 3) установления закономерностей формирования водного, солевого и теплового баланса подземных вод и использования их для прогнозов режима подземных вод; 4) регионального изучения естественного режима подземных вод как фона для анализа и прогноза нарушенного режима подземных вод на локальных участках; 5) уточнения природных условий и расчетных значений гидрогеологических параметров.

Прогнозы естественного режима используются при планировании и осуществлении различных видов строительства (гражданского, промышленного, транспортного, гидроэнергетического, мелиоративного и др.), водоснабжения, сельскохозяйственного производств и решения других народнохозяйственных задач.

Изучение слабонарушенного и нарушенного режимов подземных вод, их прогнозы и анализ проводятся при решении следующих практических задач: 1) разведке месторождений подземных вод, оценке их запасов, составлении прогнозов их режима при эксплуатации и обосновании мероприятий по рациональному использованию и охране подземных вод от истощения и загрязнения; 2) разведке и разработке месторождений твердых полезных ископаемых,

нефти и газа (прогнозы водопритоков, влияния водоотлива и устойчивости выработок, обоснование наиболее рациональных путей и методов эксплуатации месторождений и т. д.); 3) обосновании оросительных, обводнительных и осушительных мелиорации и методов управления режимом подземных вод в районах их проведения; 4) изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений и прогнозах возможных изменений гидрогеологических, гидрогеохимических, мерзлотных, мелиоративных, инженерно-геологических и других условий в связи с водоснабжением, орошением, осушением, гидротехническим, промышленным и гражданским строительством и другими видами инженерной деятельности человека и т. д.

Глава 4.2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Анализ многолетних наблюдений за режимом подземных вод свидетельствует о том, что под влиянием различных по генезису режимообразующих факторов — экзогенных (космические, метеорологические, гидрологические, биологические), эндогенных (геологические), искусственных (антропогенные) и природных условий (геологическое строение, литология, рельеф, почвы, наличие мерзлоты и т. п.) — происходят закономерные изменения физических свойств, состава и количества подземных вод, проявляющиеся в изменении их уровня и качества. Изучение этих изменений и выявление их связей с режимообразующими факторами и природными условиями являются основной целью стационарных наблюдений. Следует отметить, что наблюдения за режимом проводятся при изучении как грунтовых, так и напорных вод, хотя режим последних, если он не нарушен инженерной деятельностью человека, характеризуется сравнительным постоянством его основных элементов (пьезометрического уровня, состава и свойств).

Существенно более значительными и многообразными являются изменения режима грунтовых и неглубоко залегающих напорных вод, испытывающих заметное влияние разнообразных естественных и искусственных факторов. Эти изменения представляют наибольший научный и практический интерес в связи с необходимостью решения широкого круга народнохозяйственных задач. Для эффективного их решения в результате наблюдений за режимом должны быть получены данные о характере внутригодовых (сезонных) и многолетних колебаний основных элементов режима подземных вод (их уровней, температуры и химического состава) в различной природной обстановке и об основных факторах, определяющих характер режима подземных вод.

Только на основе выявления региональных закономерностей режима подземных вод, их генетических связей с факторами и условиями, его определяющими, можно подойти к правильному выбору и обоснованию методов прогнозов режима подземных вод, к обоснованной экстраполяции результатов стационарных наблюдений, полученных в точке, на обширные пространства, к картированию режима подземных вод и его достоверным прогнозам.

Изучение режима подземных вод осуществляется путем стационарных гидрогеологических наблюдений за изменением основных элементов режима (уровней, расходов, температуры, химического и бактериологического составов) по специально оборудуемой сети наблюдательных пунктов (скважин, источников, шурфов, колодцев, рис. 4.1). Наиболее предпочтительны

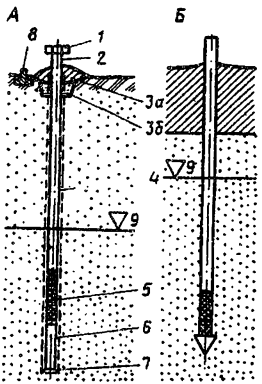


Рис. 4.1. Конструкция наблюдательных пунктов: А — наблюдательная скважина: 1 — оголовок, 2 — патрубок, 3 — комбинированный глиняно-цементный замок (*а* — цемент, *б* — глина), 4 — колонна труб, 5 — рабочая часть фильтра, 6 — отстойник, 7 — пробка, 8 — репер, 9 — уровень подземных вод; Б — штекфильтр: 9 — уровень грунтовых вод

для наблюдения за режимом подземных вод скважины и источники. В районах нарушенного режима для наблюдений используются также водозаборные и дренажные сооружения, горные выработки и т. п. При неглубоком залегании подземных вод (до 10 м) в рыхлых отложениях для наблюдений за уровнем используют забивные фильтры и штекфильтры (рис. 4.1, Б), изготовляемые из буровых труб и штанг (диаметром 2–3 мм и более).

В конструктивном отношении наблюдательные водопункты должны отвечать всем требованиям, предъявляемым к режимным пунктам (исключение загрязнений и прямого попадания атмосферных осадков, изоляция точки наблюдений от влияния других объектов, возможность отбора проб воды, замеров уровня и температуры, проведения ремонта, незначительная инерционность скважины и сопротивление фильтра и т. д.). Эти требования находят отражение в специфике сооружения и оборудования наблюдательных скважин (рис. 4.1), о чем уже говорилось в главе I.

Некоторой спецификой отличается оборудование скважин режимной сети в многолетнемерзлых породах. Она обусловлена возможностью образования ледяных пробок, для устранения которых практикуют периодический прогрев скважин паром, горячей водой, электронагревателями, заполнение стволов наблюдательных скважин соляркой или рассолом, прокачки скважин и т. д.

Методика и особенности изучения режима подземных вод зависят от целевого назначения выполняемых исследований, содержания предполагаемых к решению задач, установленных закономерностей зональности режима, природных условий района, характера влияния режимообразующих факторов и других показателей.

Изучение естественного режима подземных вод. Изучение закономерностей естественного режима грунтовых вод должно охватывать основные водоносные горизонты и проводиться во всех районах, где эти горизонты представляют интерес для народного хозяйства в настоящее время или в перспективе. В результате таких исследований должны быть изучены ход сезонных и многолетних колебаний уровня и других элементов режима в различных гидрогеологических условиях, основные факторы режима, амплитуды сезонных и многолетних колебаний уровня и т. д.

Размещение опорной наблюдательной сети осуществляется на основе районирования исследуемой территории по условиям формирования режима грунтовых вод, с использованием крупномасштабных гидрогеологических карт и с учетом степени изученности каждого из районов. При районировании территории учитывается влияние основных режимообразующих факторов, свойственных выделяемым гидрогеологическим районам (по климатическим условиям выделяются провинции, по степени увлажненности — зоны, по степени дренированности — области, по литологическому составу водовмещающих пород — районы, по геоморфологическим условиям — участки, по мощности зоны аэрации — площади), и тем самым определяется направленность исследований по изучению режима и баланса подземных вод.

Наблюдательная сеть размещается в пределах каждого из гидрогеологических районов (основная единица районирования) в виде створов, ориентированных от водоразделов к дренам так, чтобы наблюдениями были охвачены все характерные для данного района комплексы водовмещающих пород и геоморфологические элементы (участки междуречий, склонов, террас и пойм, площади с различной мощностью зоны аэрации и т. д., рис. 4.2). Скважины на створах следует располагать в виде кустов (3 скважины, расположенные по потоку в условиях одномерного потока, и конверт из 5 скважин при радиальном в плане потоке), что обеспечивает определение элементов баланса грунтовых вод на основе гидродинамического анализа режима их уровня (при глубине залегания грунтовых вод не более 10 м последнее также возможно с помощью лизиметров-испарителей). Створы скважин располагают в направлении максимального изменения гидрогеологических показателей (по потоку).

В простых условиях при однородном строении водоразделов или террас в бассейнах крупных рек рекомендуется расположить по кусту скважин (поперечник из 3 скважин или конверт из 5 скважин) в пределах водораздела, на склоне от водораздела к террасе, на террасах и 3 скважины в зоне гидрогеологического воздействия основной дрены. При дренировании речной доли-

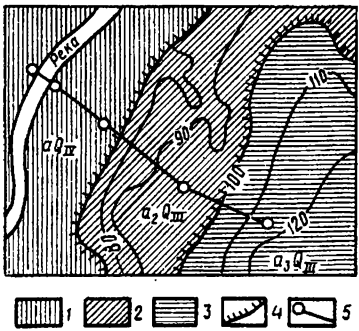


Рис. 4.2. Схема расположения наблюдательных скважин в гидрогеологическом районе:
1 — участок с приречным типом режима подземных вод;
2 — участок со склоновым типом режима подземных вод;
3 — участок с междуречным типом режима подземных вод;
4 — границы террас;
5 — створ наблюдательных скважин

ной напорных вод следует дополнительно заложить скважины на напорный водоносный горизонт, как на водоразделе, так и в долине. В бассейнах малых рек кусты скважин на склонах и террасах можно не закладывать. Наблюдательные пункты по возможности следует приближать к гидрометеорологическим постам. Максимальное расстояние между наблюдательными пунктами в пределах однородного по гидрогеологическим условиям района не должно превышать 100 км, так как за этими пределами в режиме грунтовых вод ощутимо проявляется климатическая зональность. В сложных по геоморфологическим и литологическим условиям районах наблюдательная сеть сгущается, (скважины располагаются на типовых участках, нередко вне створов).

Разместив, таким образом, наблюдательную сеть в пределах районов, автоматически обеспечивают изучение режима грунтовых вод в пределах областей, зон и провинций рассматриваемой территории.

Размещение наблюдательной сети для изучения естественного режима напорных вод также осуществляется на основе районирования территории, проводимого с учетом влияния основных режимообразующих факторов (геологического, тектонического и орографического строения, степени дренированности и глубины залегания подземных вод, условий их питания и разгрузки, литологии водоносных пород, взаимосвязи подземных и поверхностных вод и т. д.). Основной единицей такого районирования должен быть бассейн подземных вод, выделяемый по геоструктурным условиям. В пределах каждого из бассейнов схемы расположения точек наблюдательной сети для изучения режима и баланса грунтовых и напорных вод должны быть взаимосвязаны. Изучению

подвергаются лишь основные по значимости водоносные комплексы и горизонты. Наблюдательные пункты в их пределах размещают на основе карт распространения, глубин залегания, гидроизопьез, литологического состава, гидравлической взаимосвязи горизонтов, химического состава подземных вод и др. Особенности артезианских бассейнов платформенного типа и артезианских бассейнов горноскладчатых областей предопределяют некоторую специфику размещения наблюдательных сетей при изучении режима подземных вод.

В артезианских бассейнах платформенного типа наблюдательная сеть размещается по створам, заданным от областей питания изучаемых водоносных горизонтов к областям их разгрузки. Для малых артезианских бассейнов с однородным строением горизонтов необходимо закладывать не менее трех скважин на каждый горизонт (по одной скважине в области питания, напора и разгрузки). При наличии нескольких областей питания и разгрузки, фациальной изменчивости горизонтов, а также в крупных артезианских бассейнах число скважин в створах увеличивается. При изучении в пределах бассейна нескольких водоносных горизонтов или их взаимосвязи скважины располагаются *«кустами»* с ярусно расположенными фильтрами в пределах изучаемых горизонтов.

В районах переуглубленных речных долин платформенных областей необходимо закладывать скважины на аллювий современной и переуглубленной долин как в пределах поймы и низких террас (где имеют место взаимосвязь и разгрузка различных горизонтов), так и на высоких террасах и водоразделах (где может осуществляться питание подземных вод переуглубленной долины), а также на нижележащий горизонт (рис. 4.3). В пределах переуглубленных долин горных областей помимо поперечных створов следует предусматривать и продольные створы (для выявления картины снижения напоров вдоль долины).

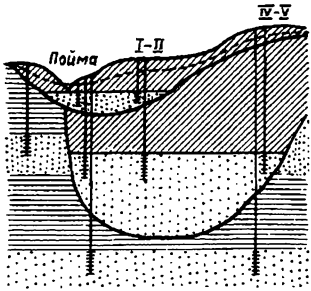


Рис. 4.3. Размещение наблюдательных скважин в переуглубленной долине (римские цифры – номера террас современной долины)

При изучении режима подземных вод предгорных артезианских

бассейнов (конусов выноса и пролювиальных шлейфов) наблюдательную сеть следует закладывать створами из 3–5 скважин по направлению от гор к долине или впадине. По мере выявления новых водоносных горизонтов необходимо закладывать дополнительные скважины на эти горизонты. Для изучения влияния фильтрационной неоднородности в предгорных бассейнах целесообразно иметь поперечный створ скважин, перпендикулярный основному. В области разгрузки организуются наблюдения за источниками.

Для изучения естественного режима межгорных артезианских бассейнов наблюдательную сеть целесообразно размещать двумя-тремя створами поперек межгорных долин или впадин в зависимости от их протяженности, дополняя эти створы единичными скважинами между ними и образуя, таким образом, один продольный створ с поперечниками (рис. 4.4). Поперечные створы следует размещать в верхней, средней и нижней частях долины, охватывая области питания, распространения и разгрузки напорных вод. Скважины обычно располагают кустами, чтобы охватить наблюдениями основные горизонты. В мелких межгорных бассейнах продольный створ можно не закладывать.

В малых артезианских бассейнах мульд и грабенов помимо основного створа от области питания до области разгрузки следует предусматривать и перпендикулярный ему створ для оценки влияния боковых границ.

Наблюдения за режимом подземных вод должны быть комплексными, т. е. включать изучение изменений их уровня, температуры и химического состава, а в засушливых районах — и солевого состава почв и пород зоны аэрации. В районах развития многолетнемерзлых пород, кроме традиционных, ведутся наблюдения за изменением глубины промерзания и оттаивания пород и их температуры. Частота наблюдений зависит от целевого назначения выполня-

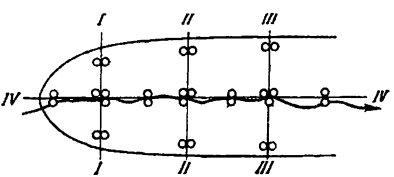


Рис. 4.4. Схема размещения кустов и поперечников наблюдательных скважин в межгорном артезианском бассейне; I–IV — номера створов

емых исследований, характера и степени влияния естественных и искусственных факторов, особенностей режима, длительности цикла наблюдений и других факторов. В среднем наблюдения за естественным режимом подземных вод проводятся 10 раз в месяц. В периоды интенсивного воздействия режимообразующих факторов (паводки, осадки и др.) частота наблюдений за режимом подземных вод (особенно грунтовых) увеличивается в 2–3 раза. Наблюдения за изменением химического и бактериологического состава подземных вод и их температуры выполняются реже, чем наблюдения за их уровнем (от 2–3 раз в месяц до 4–6 раз в год). Частота измерений элементов режима напорных вод обычно в 2–3 раза меньше, чем грунтовых.

Для первого периода исследований естественного режима подземных вод продолжительностью 2–3 года может быть рекомендована более широкая сеть наблюдательных точек, а затем на основе анализа полученных данных по режиму эта сеть может быть несколько сокращена, а частота дальнейших наблюдений уменьшена. В пределах каждого гидрогеологического района (участка) сохраняются те пункты, по которым полученные параметры режима близки к средним для данного района, установленным по широкой сети точек. Следует отметить, что изучение региональных закономерностей режима грунтовых вод проводится также и в районах, где природный режим на больших площадях нарушен искусственными факторами, а влияние последних приобретает региональный характер.

Особенности изучения нарушенного режима подземных вод. Изучение нарушенного режима подземных вод имеет важное значение при решении многих практических задач, связанных с использованием подземных вод или их регулированием. При организации такого изучения особое значение приобретают наблюдения за влиянием искусственных факторов, а выявленные количественные связи между отдельными элементами режима подземных вод (уровнем, температурой, химическим или бактериологическим составом) и искусственными факторами являются основой для выполнения прогнозов и обоснования мероприятий по рациональному использованию и регулированию подземных вод.

Принципы размещения наблюдательной сети и методика проведения наблюдений за нарушенным режимом устанавливаются с учетом природных особенностей района, его изученности, возможной степени влияния различных режимообразующих факторов, целевого назначения и задач планируемых исследований. Размещение наблюдательной сети и выполняемые наблюдения должны обеспечивать изучение особенностей нарушенного режима подземных вод, количественную оценку влияния искусственных факторов

(водоотбора, дренажа, орошения и др.) на отдельные элементы их режима (уровень, температуру, качество), уточнение природных условий изучаемых объектов, их расчетных параметров и схем, выполнение инженерных прогнозов и т. д.

В каждом случае схема размещения наблюдательных скважин устанавливается с учетом распространения изучаемых водоносных горизонтов, их гидравлической взаимосвязи, граничных условий, гидрогеохимической обстановки, литологии водоносных пород, особенностей влияния инженерных сооружений и характера поставленных перед наблюдениями задач. Она должна обеспечивать также изучение и естественного режима подземных вод как фона, на котором формируется их нарушенный режим.

Частота наблюдений за элементами режима подземных вод должна обеспечивать выявление основных закономерностей их изменения с учетом характера поставленных задач и предполагаемых методов их решения. Так, если данные наблюдений за режимом подземных вод предполагается использовать для определения гидрогеологических параметров, целесообразно иметь непрерывную запись изменения уровня и расхода (применение самописцев, расходомеров и т. п.). Для выявления общих закономерностей режима подземных вод наблюдения достаточно проводить 5–10 раз в месяц и реже. На участках гидравлической взаимосвязи подземных вод с поверхностными в периоды паводков и интенсивного выпадения атмосферных осадков уровень следует замерять ежедневно (в одно и то же время суток с точностью замера ±1 см).

Наблюдения за изменением температуры воды необходимо осуществлять по выборочной сети режимных скважин через определенные интервалы глубин (0,2–0,8 м в слое суточных переменных температур, 2,5 м — до глубины 40 м, 25–50 м — до глубины 400 м и далее через 100 м до забоя). В пределах изучаемых водоносных и водоупорных горизонтов дополнительно измеряется температура не менее чем в трех точках (у кровли, в средней части и у подошвы горизонта). Частота измерений определяется целевым назначением наблюдений (от 5 раз в сутки для определения суточных изменений до одного раза в квартал для выявления закономерностей годовых изменений температуры). При специальных термометрических исследованиях шаг и частота замеров детализируются с учетом поставленных задач.

Состав и методика наблюдений за режимом химического состава подземных вод также зависят от целевого назначения. Основным типом химических анализов является сокращенный анализ (см. далее). Полный химический анализ воды выполняется один раз в 1–2 года. При специальных исследованиях закономерностей изменения химического состава вод в разрезе вследствие

подтягивания некондиционных вод целесообразно иметь несколько скважин с ярусно расположенными фильтрами. Состав анализов может быть ограничен определением компонентов или показателей, изменение которых ожидается при подтягивании некондиционных вод. Частота отбора проб для анализа зависит от цели исследований, но всегда увеличивается при активизации действия факторов, изменяющих состав вод (паводки, поливные периоды, интенсификация водоотбора и др.). При изучении взаимосвязи подземных вод с поверхностными проводят синхронные отборы их проб.

Ниже остановимся на некоторых особенностях изучения режима подземных вод при решении важнейших практических задач (в районах эксплуатации подземных вод, орошения, осушения, строительства).

Районы водозаборов. Наблюдения за режимом подземных вод в районах водозаборов проводятся как в процессе поисково-разведочных работ (в основном за естественным режимом), так и при эксплуатации водозаборов, особенно крупных, действующих в сложных гидрогеологических условиях, с ограниченными или невыясненными источниками формирования их эксплуатационных запасов. На основе этих наблюдений в процессе поисково-разведочных работ проводятся: 1) определение расчетных параметров и характеристик, используемых при геолого-промышленной оценке источников водоснабжения и прогнозах условий работы водозаборов (расчетные значения мощностей и напоров, минимально и максимально допустимые понижения уровня, коэффициенты водопроводимости, уровне- и пьезопроводности, упругоемкости, недостаток насыщения и водоотдача); 2) уточнение граничных условий области фильтрации (степень гидравлической связи подземных вод с рекой и другими горизонтами, зависимость их режима от осадков и испарения); 3) оценка размеров и возможных изменений естественного восполнения запасов; 4) оценка качества подземных вод и возможных его изменений.

Для решения указанных задач обычно осуществляется цикл наблюдений в течение 1–3 лет (минимум годичный), при возможности привлекаются данные стационарных наблюдений ближайших наблюдательных водопунктов опорной сети. В дальнейшем при развитии государственной опорной сети наблюдательных пунктов для решения перечисленных задач можно будет ограничиться разовыми замерами элементов режима на участке разведки с привлечением и соответствующей корректировкой всей необходимой для прогнозов информации по наблюдательным пунктам опорной сети, находящимся в аналогичных с изучаемыми природных условиях.

Стационарные наблюдения в процессе эксплуатации водозаборов должны обеспечить решение задач по уточнению расчетной схемы и гидрогеологи-

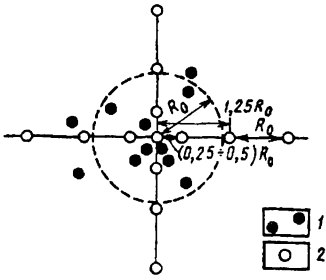


Рис. 4.5. Схемы размещения наблюдательной сети на действующих водозаборах: А — в удалении от границ; Б — в долине реки; 1 — эксплуатационные скважины, 2 — наблюдательные скважины; R_0 — радиус «большого» колодца

ческих параметров, корректировку ранее выполненных прогнозов по условиям эксплуатации водозабора и месторождения в целом, разработку мероприятий по оптимизации условий работы водозабора и охране подземных вод от загрязнений и истощения. В соответствии с этими задачами наблюдательные пункты на водозаборах должны размещаться с учетом типа месторождения подземных вод, его граничных условий, геолого-гидрогеологических особенностей и других факторов. Обычно наблюдательные пункты располагают по двум взаимно пересекающимся створам, проходящим через центр водозабора, рассматриваемого в виде большого колодца радиусом R_0. В каждом створе закладывают от 3 до 7 скважин: 1 в центре, 2 внутри большого колодца на расстоянии $(0{,}25–0{,}5)R_0$ от центра, 1–2 на расстоянии $(1–1{,}25)R$ и 1–2 на расстоянии $(1{,}5–2)R_0$. Желательно иметь наблюдательные скважины у ближайших границ потока, а также вне зоны влияния водозабора (естественный фон). В условиях перетекания рядом с наблюдательными скважинами на основной горизонт закладываются скважины на смежные горизонты и разделяющие толщи (только в пределах большого колодца).

Створы ориентируют нормально к границам потоков и контурам их питания и разгрузки. Расстояния между соседними скважинами в зоне влияния водозабора уточняются из условия обеспечения в них разницы уровней не менее 0,25–0,3 м.

На рисунке 4.5 приведены схемы размещения наблюдательных пунктов на водозаборах, расположенных вдали от границ пласта и вблизи реки. Наблюдательный створ, ориентированный к реке (не менее 3 скважин, одна на урезе реки), должен обеспечить количественную оценку взаимосвязи подземных и поверхностных вод и особенностей их режима.

В сложных гидрохимических и санитарных условиях наблюдательная сеть должна обеспечивать и информацию о продвижении контуров некондиционных вод в плане и разрезе (створы к контурам и кусты ярусно расположенных скважин), о тенденциях в изменении качества воды (питьевого, лечебного, промышленного). В районах строительства и интенсивной эксплуатации напорных вод песчано-глинистых отложений необходимы также наблюдения за возможными осадками поверхности земли. Наблюдения за режимом на действующих водозаборах дополняются наблюдениями за соответствующими элементами режима (уровнями, дебитами, качеством воды) по всем эксплуатируемым скважинам, а при необходимости — и гидрологическими исследованиями поверхностных водотоков. Частота замеров элементов режима на водозаборах хозяйственно-питьевого назначения принимается обычно не менее 10 раз в месяц, на других водозаборах реже: на инфильтрационных водозаборах, работающих при установившемся режиме, наблюдения сокращаются до одного раза в месяц.

Районы орошения и осушения. Изучение режима подземных вод (как естественного, так и нарушенного) является в таких районах одним из наиболее важных видов гидрогеологических исследований, без проведения которого невозможны научно обоснованное планирование мелиоративного строительства и эффективная эксплуатация систем орошения и осушения.

В районах орошения такие исследования проводятся для оценки мелиоративного состояния земель, проектирования систем орошения и дренажа, обоснования режима орошения и эффективности работы дренажных сооружений, необходимости проведения промывных поливов, агромелиоративных и других мероприятий. Для выявления основных закономерностей режима и обоснования мелиоративных мероприятий здесь чрезвычайно важным является также изучение водного и солевого балансов орошаемых массивов.

Размещение наблюдательной сети осуществляется на основе карт гидрогеолого-мелиоративного районирования с учетом специфики решаемых задач и особенностей мелиоративного освоения территории. При этом необходимо предусмотреть изучение режима подземных вод (грунтовых и связанных и с ними напорных) основных горизонтов вплоть до регионального водоупора. Для этого размещаются одиночные скважины и кусты пьезометров. Спецификой выполняемых исследований является необходимость полного учета всего комплекса ирригационно-хозяйственных условий и факторов, оказывающих решающее влияние на формирование режима грунтовых вод.

Для решения специальных задач (определение гидрогеологических параметров, оценка влияния на режим подземных вод мелиоративных систем

и др.) следует предусматривать размещение скважин по створам, пересекающим крупные каналы, дрены, поливные и осушительные участки. К числу элементов наблюдений при изучении режима относятся уровень, температура и химический состав подземных вод, расходы скважин, каналов и дрен, составные элементы водного и солевого балансов.

В районах осушения исследования режима проводятся для обоснования проектирования осушительных систем, оценки эффективности их действия во времени и по площади, осуществления контроля и регулирования водного режима почв, определения параметров осушаемых пород и осушительных систем, оценки влияния систем осушения на прилегающие территории и решения других задач. Так же, как и на массивах орошения, здесь важная роль отводится водно-балансовым исследованиям, во многом определяющим направленность мелиоративных мероприятий, большое значение придается региональным исследованиям режима.

Районы разработки месторождений полезных ископаемых. Основным режимообразующим фактором в таких условиях является рудничный водоотлив. Создаваемая для наблюдений за режимом сеть должна обеспечить определение эффекта водоотлива, изменение этого эффекта во времени в зависимости от влияния естественных (атмосферные осадки, поверхностный сток) и искусственных (расширение и углубление фронта горных работ, система отработки) факторов, изучение изменения состава и качества рудничных вод, наблюдения за развитием депрессионной воронки и оценку влияния водоотлива на гидрогеологические и мелиоративные условия прилегающих территорий, уточнение схемы и параметров водоотлива и разработку мероприятий по рациональному использованию и охране водных, земельных и других природных ресурсов.

С учетом необходимости решения перечисленных задач наблюдательная сеть обычно устраивается в виде двух пересекающихся створов, лучи которых ориентируются от центра разрабатываемого рудного поля (участка) к ближайшим границам водоносных пластов (горизонтов), обводняющих месторождение. При изучении режима нескольких в разрезе горизонтов наблюдательные пункты в створах устраиваются в виде кустов скважин. К элементам наблюдений относятся уровни, температура и качество подземных вод, величины водопритока и водоотлива. Частота замеров обычно составляет 3–5 раз в месяц. Она увеличивается при интенсивном проявлении основных режимообразующих факторов (до 10 и более раз в месяц).

Районы промышленного и гражданского строительства. Изучение и прогноз режима грунтовых (а иногда и напорных) вод являются обязательными

при проектировании инженерного строительства в силу их определяющего влияния на инженерно-геологические условия и экономическую эффективность строительства. Наблюдения за режимом подземных вод начинаются еще в процессе изысканий под строительство (естественный режим) и продолжаются в дальнейшем уже с учетом возможного проявления разнообразных искусственных факторов (утечек из различных трубопроводных систем, сброса сточных вод, нагрузки от зданий и сооружений, действия дренажей, регулирования поверхностного стока и т. д.). Задачи таких наблюдений чрезвычайно разнообразны, но в общем они сводятся к выявлению особенностей естественного и нарушенного режимов, прогнозам и оценке влияния различных искусственных и естественных факторов на режим подземных вод освоенной территории и условий ее дальнейшего использования.

Глава 4.3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ БАЛАНСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучение баланса подземных вод проводится в связи с необходимостью выявления и оценки ведущих факторов формирования режима подземных вод, определения путей прогноза и управления режимом в связи с эксплуатацией инженерных сооружений и отдельных территорий, при гидрогеологическом обосновании проектов систем орошения и осушения, оценке естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод (источники восполнения), величины подземного питания рек и решения других практических и теоретических задач. Баланс изучается как для отдельных участков территории (на водно-балансовых площадках), так и для крупных районов и целых бассейнов рек (в пределах ключевых балансовых участков и репрезентативных бассейнов).

В гидрогеологической практике для изучения водного баланса широко применяются две группы методов: 1) гидродинамического анализа режима подземных вод (с использованием аналитических и конечноразностных решений дифференциальных уравнений) и 2) экспериментальные (водно-балансовый и лизиметрический).

Метод гидродинамического анализа режима подземных вод основан на применении теории неустановившегося движения грунтовых вод к расчету основных элементов их баланса по данным наблюдений за режимом подземных вод. Метод всесторонне учитывает гидрогеологическую обстановку, позволяет количественно оценить инфильтрацию осадков, оросительных вод, достигающих уровня грунтовых вод, расход последних на суммарное испарение и подземный сток, а также оценить необходимые гидрогеологические параметры. Все эти данные непосредственно используются при составлении прогнозов изменения режима подземных вод под влиянием хозяйственной деятельности человека. Метод особенно эффективен и экономичен в практике гидрогеологических исследований, поскольку главным исходным материалом служат данные наблюдений за режимом уровня воды, получаемые по специальным створам наблюдательных скважин, закладываемых на типичных балансовых участках (элементах потока). В обобщенном виде баланс грунтовых вод для элемента потока площадью F за время Δt выражается уравнением

$$\mu\Delta H=\frac{Q_1-Q_2}{F}\Delta t+W\Delta t+W_{ел}\Delta t, \qquad (4.1)$$

где μ — водоотдача или недостаток насыщения пород; Q_1 и Q_2 — соответственно приток и отток грунтовых вод в элементе потока; W — величина питания грунтовых вод (может быть положительной при инфильтрации атмосферных

и поливных вод и отрицательной— за счет испарения); $W_{гл}$ — интенсивность перетекания через подошву за счет водообмена с нижезалегающим водоносным горизонтом.

Сущность метода состоит в том, что все входящие в уравнение (4.1) элементы водного баланса Q_1, Q_2, W и $W_{гл}$ определяются с использованием данных о положении уровня воды в скважинах, выделяющих элементы потока, по соответствующим формулам динамики подземных вод (аналитические или конечно-разностные решения). При этом необходимо предварительно оценить используемые при расчетах гидрогеологические параметры (коэффициенты водопроводимости, уровнепроводности, коэффициент фильтрации раздельных слоев и др.). Для этого в принципе можно использовать данные стационарных наблюдений (если эти параметры не определены в результате опытно-фильтрационных работ).

Вычислив элементы баланса грунтовых вод по каждому участку потока в годовом разрезе, выявляют корреляционные связи этих элементов с главнейшими факторами, например с мощностью зоны аэрации или другими определяющими условиями. Используя выявленные корреляционные связи, экстраполируют результаты на всю изучаемую площадь. При этом строят карты по сезонам года: величин питания грунтовых вод $W\Delta t$, разности между притоком и оттоком $(\Delta Q/F)\Delta t$, аккумуляции запасов грунтовых вод и др., позволяющие изучать процесс формирования подземного стока, оценивать ресурсы подземных вод и решать другие практические задачи.

Экспериментальные методы позволяют определить элементы водного баланса на типичных по гидрогеологическим условиям балансовых участках. Это дает возможность последующего переноса получаемых данных на всю изучаемую или аналогичную по гидрогеологическим условиям территорию. При водно-балансовом методе все элементы водного баланса, входящие в балансовое уравнение типа (4.1), определяются экспериментально с помощью различных приборов и опытных установок независимо друг от друга. При лизиметрическом методе экспериментальное определение элементов водного баланса осуществляется с помощью специальных лизиметрических установок различных конструкций.

Лизиметры с постоянным уровнем грунтовых вод позволяют непосредственными измерениями определять инфильтрационное питание или суммарное испарение, обусловленное совокупным влиянием всех действующих факторов за расчетный промежуток времени Δt (рис. 4.6). Эти величины соответственно определяются объемами воды, отбираемой (сливаемой) или добавляемой для поддержания в лизиметре заданного постоянного уровня воды.

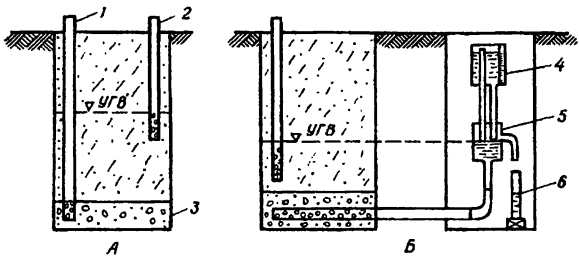


Рис. 4.6. Схема устройства лизиметров: А — лизиметр с нарушенным монолитом (с постоянным уровнем грунтовых вод); Б — то же, с непрерывным регулированием уровня грунтовых вод; 1 — доливная трубка; 2 —наблюдательная трубка; 3 — песчано-гравийный фильтр; 4 — сосуд Мариотта; 5 — сливной бачок; 6 – сосуд для измерения инфильтрации до уровня грунтовых вод

Для получения зависимостей величин этих элементов баланса от мощности зоны аэрации устанавливается серия подобных лизиметров с монолитами почвы на площадках, различающихся лишь глубиной до воды (от 1 до 3–4,5 м).

Лизиметры с переменным во времени уровнем грунтовых вод, автоматически поддерживаемым на высоте естественного уровня, позволяют определять величины разности между притоком и оттоком грунтовых вод в горизонтальном направлении.

Комбинированная установка обоих типов лизиметров с постоянным и переменным уровнями воды и наблюдательной скважины на грунтовые воды, по которой определяют величину изменения уровня воды ΔH, позволяет рассчитывать важный параметр водоотдачи или недостатка насыщения пород μ по формуле

$$\mu = \frac{\Delta t}{\Delta H}\left(\frac{Q_1 - Q_2}{F} + W\right), \qquad (4.2)$$

где все величины определяются экспериментально. Установленные в результате лизиметрических наблюдений зависимости изменения величин инфильтрации, конденсации и испарения от мощности зоны аэрации и других факторов дают основания для обоснованной экстраполяции установленных закономерностей и особенностей водного баланса на всю изучаемую территорию.

Глава 4.4. ПРОГНОЗ И КАРТИРОВАНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Важнейшими задачами изучения режима и баланса подземных вод являются обоснованный прогноз и картирование их режима во времени и в пространстве. Под прогнозом режима подземных вод понимается предвидение развития гидрогеологических процессов и явлений во времени и в пространстве, т. е. изменений уровня, температуры, химического состава, ресурсов или запасов подземных вод, происходящих под воздействием различных естественных и искусственных факторов. Теоретической предпосылкой прогнозов является выявление основных закономерностей и связей в формировании режима подземных вод под влиянием воздействия и изменения режимообразующих факторов (естественных и искусственных).

При прогнозах естественного и нарушенного режима подземных вод пока устанавливаются и используются корреляционные связи элементов режима только с наиболее динамичными режимообразующими факторами, в основном климатическими (осадки, испарение, температура и др.) и искусственными (водозабор, водоотлив, орошение, дренаж и др.), а сами прогнозы выполняются применительно к отдельным элементам режима (уровня, дебитов, химического состава, температуры).

Виды прогнозов. В зависимости от преобладающего действия режимообразующих факторов и целевого назначения выделяют прогнозы естественного и нарушенного режимов подземных вод. Прогноз естественного режима служит фоном, на основе которого даются прогнозы нарушенного режима. Прогноз естественного режима является прогнозом общего пользования, а прогнозы нарушенного режима — специализированными. По заблаговременности осуществления прогнозы подразделяются на экстренные (за 1–15 сут.), краткосрочные, долгосрочные (сезонные и многолетние) и сверхдолгосрочные (за 3 года и более). Экстренные прогнозы выдаются с целью предупреждения о возможных опасных проявлениях изменения режима подземных вод, остальные используются для планирования водохозяйственных мероприятий.

Методы прогнозов. Для прогнозов режима подземных вод применяются следующие группы методов: 1) гидродинамические; 2) вероятностно-статистические (факторные); 3) тенденций; 4) балансовые; 5) гидрогеологической аналогии.

Гидродинамические методы основаны на использовании соответствующих формул динамики подземных вод и обычно применяются в условиях, когда режим предопределяется действием одного-двух факторов. В эту груп-

пу входят методы, основанные на использовании уравнений Буссинеска–Майе–Форхгеймера, аналитические решения для прогноза подпора, условий работы водозаборных, дренажных и других сооружений, конечно-разностные решения и моделирование. Все эти методы в основном позволяют прогнозировать изменения уровня и дебита и требуют предварительного определения расчетных параметров и фильтрационной схемы области фильтрации.

Вероятностно-статистические методы базируются на выявлении и использовании при прогнозах причинно-следственных связей между элементами режима подземных вод и определяющими их факторами (одним, двумя или совокупностью многих). Установленные прогностические связи позволяют прогнозировать элементы режима подземных вод с указанием достоверности их прогноза.

Методы тенденций основаны на экстраполяции выявленных по материалам предшествующих наблюдений тенденций в ходе многолетних колебаний уровня подземных вод.

Балансовые методы прогноза основаны на использовании соответствующих уравнений водного баланса и прогнозе поведения уровня или других элементов режима в зависимости от соотношения отдельных элементов водного баланса, определяемых экспериментально или аналитически.

Прогнозы методом гидрогеологической аналогии заключаются в экстраполяции отдельных установленных особенностей и закономерностей режима подземных вод на аналогичные по гидрогеологическим условиям с изученным участки.

Картирование режима подземных вод. Существенные изменения уровня, запасов и качества подземных вод во времени и в пространстве определяют необходимость картирования установленного и прогнозируемого режимов подземных вод. В зависимости от назначения, картируемых или прогнозируемых элементов и других показателей содержание карт может быть самым разнообразным. Так, карты информации содержат в основном информацию, полученную в результате наблюдений за режимом подземных вод, а карты прогнозов дают представление о возможных изменениях этого режима. Условно карты режима подземных вод подразделяются на синтетические, аналитические и комплексные.

Синтетические карты дают обобщенное представление о закономерностях режима и чертах его сезонных и многолетних изменений. К ним относятся карты районирования территорий по особенностям и типам режима подземных вод (по масштабам они подразделяются на обзорные, мелко-, средне- и крупномасштабные), на которых приводятся обобщенные характеристики всех выделяемых разновидностей режима подземных вод.

Аналитические карты дают представление о площадном изменении отдельных элементов режима. Сюда относятся карты глубин залегания подземных вод (на определенную дату), различной обеспеченности уровней грунтовых вод (например 1, 3, 5, 50, 95, 97 и 99%), режима уровней подземных вод, амплитуд колебаний уровней подземных вод и др.

На комплексных картах отражается одновременно несколько различных характеристик режима подземных вод. Например, на картах баланса подземных вод могут быть отражены инфильтрационное питание (цветом), испарение (штриховкой) и подземный сток (изолиниями). Возможно комплексирование и других типов карт.

Детальное изложение вопросов прогноза и картирования режима подземных вод содержится в работах В. С. Ковалевского, А. А. Коноплянцева и С. М. Семенова.

Заблаговременность составляемых прогнозов колеблется от 1,5 до 4 месяцев в зависимости от приуроченности того или иного района к соответствующей ландшафтно-климатической зоне.

Прогноз режима грунтовых вод выдается в виде карты распределения предсказываемых уровней и пояснительного текста к ней. На карте величины прогнозных уровней грунтовых вод представляются в виде коэффициентов относительного положения λ_h. Коэффициенты относительного положения характеризуют величину отклонения уровня от среднемноголетних значений, выраженную в процентах или долях многолетней амплитуды A.

Данный метод картирования режима уровня грунтовых вод позволяет преодолеть ограничения, связанные со значительной фильтрационной неоднородностью зоны аэрации и литологических особенностей водовмещающих пород, а также с разнообразием в геоморфологии местности. Коэффициент относительного положения уровня λ_h вычисляется по формуле:

$$\lambda_h = (h_{макс} - h_p)/(h_{макс} - h_{мин}), \qquad (4.3)$$

в соответствии с которой расчетная глубина до уровня грунтовых вод h_p (в метрах от поверхности земли) определяется выражением

$$h_p = h_{макс} - \lambda_h (h_{макс} - h_{мин}) = h_{макс} - \lambda_h A = h_{мин} + \lambda_h A. \qquad (4.4)$$

В формулах (4.3) и (4.4) $h_{макс}$ и $h_{мин}$ — максимальная и минимальная глубины уровня грунтовых вод за весь период наблюдений (иногда вместо $h_{макс}$ и $h_{мин}$ принимают глубины 1%-ной и 99%-ной обеспеченности).

Существующая синхронность в ходе колебаний дает возможность распространять результаты прогноза, полученные в репрезентативной наблюдательной точке, на значительное расстояние.

Дополнительную информацию можно получать из прилагаемой карты распределения фактических уровней предшествующего года, также составленной в относительных показателях. Наличие двух карт позволяет более наглядно представить степень и направленность изменений прогнозируемых уровней в многолетнем разрезе.

Учитывая, что основным показателем величины и изменения естественных ресурсов является уровень (мощность горизонта) и амплитуда его изменений, можно осуществлять прогнозы и картирование изменений естественных ресурсов грунтовых вод в относительных показателях, используя аналогично понятию коэффициента относительного положения уровня λ_h понятие о коэффициенте относительной изменчивости естественных ресурсов $\lambda_{\Delta h}$:

$$\lambda_{\Delta h} = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{мин}}{\Delta h_{макс} - \Delta h_{мин}}, \qquad (4.5)$$

где Δh_i — прогнозируемая величина амплитуды весеннего подъема уровня в данной точке; $\Delta h_{макс}$ и $\Delta h_{мин}$ — соответственно максимальная и минимальная амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод за многолетний период.

Карты распределения прогнозных уровней и изменения естественных ресурсов грунтовых вод дают возможность принимать оперативные решения по планированию и проведению различных водохозяйственных мероприятий и использовать эту информацию при решений любых гидрогеологических задач.

Глава 4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Успешное использование данных наблюдений за режимом подземных вод для определения гидрогеологических параметров возможно лишь в тех случаях, когда достаточно хорошо установлены природные условия и факторы, определяющие изменение (или распределение) уровней подземных вод в пределах изучаемой территории, и, следовательно, правильно и обоснованно могут быть выбраны исходные уравнения или расчетные зависимости, описывающие закономерности этих изменений. В зависимости от сложности природных условий области фильтрации и действия обусловливающих закономерности поведения уровня факторов для определения гидрогеологических параметров решением обратной задачи используются аналитические зависимости (обычно при однородном строении области фильтрации и простых природных условиях) или уравнения в конечных разностях (в сложной природной обстановке). В очень сложных природных условиях обратная задача решается с помощью моделирования или ПК.

На основе стационарных наблюдений определяются минимальные и средние значения мощностей и напоров водоносных горизонтов и комплексов, коэффициенты уровне- и пьезопроводности, недостаток насыщения и водоотдача горных пород в зоне колебания уровня подземных вод, упругая водоотдача, интенсивность инфильтрационного питания W или обобщенный параметр W/K степень гидравлической связи водоносных горизонтов с рекой (обобщенный показатель ΔL, учитывающий степень заиленности и закольматированности русла реки и подрусловых пород, несовершенство вреза реки, сопротивление ее ложа и другие факторы).

Наиболее достоверно гидрогеологические параметры определяются по данным наблюдений за изменением уровня подземных вод в районах действующих водозаборных и дренажных сооружений, в прибрежных зонах рек, каналов и водоемов, где основнымифакторами изменения уровня подземных вод являются их водоотбор или изменения горизонта поверхностных вод, а амплитуды и зоны проявления таких изменений весьма значительны. Приемы и методы определения параметров по данным эксплуатации водозаборных и дренажных сооружений аналогичны изложенным в главе 3 для опытных откачек и выпусков. Однако при обработке данных эксплуатации водозаборных и дренажных сооружений возникает необходимость учета таких факторов, как сложный характер возмущения, рассредоточенное размещение возмущающих скважин и т. д.

Скан страницы отсутствует

Скан страницы отсутствует

соответствующее изменение уровня в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии x от границы за то же время t. Значение водоотдачи μ при известной водопроводимости T и найденном значении уровнепроводности устанавливается по соотношению $\mu = T/a$.

При использовании описанного метода соотношения уровней $\Delta H(x, t)/\Delta H_0$ должны быть достаточно ощутимыми (в пределах 0,2÷0,5). Характер изменения уровня на границе и в скважинах устанавливается по графикам режимных наблюдений. Если при этом имеет место несовершенство вреза водотока, то они должны учитываться в величине x при рассмотрении аргумента $\lambda=\left(x+\Delta\lambda\sqrt{at}\right)$ и соответственно при определении уровнепроводности. Для условий мгновенного изменения уровня воды на границе полуограниченного потока в решении для $\Delta H(x, t)$ вместо функции $R(\lambda)$ учитывается функция $[1 - \Phi(\lambda)]$, и тогда соотношение изменения уровней по двум точкам рассматривается в виде:

$$\Phi(\lambda)=1-\frac{\Delta H(x,t)}{\Delta H^0}. \qquad (4.9)$$

Дальнейший ход определения параметров λ, a и μ аналогичен рассмотренному. Для определения аргумента λ по значению функции $\Phi(\lambda)$ используются таблицы или графики из справочных руководств.

Оценку сопротивления ложа водных границ (рек, водохранилищ, каналов, дрен) целесообразнее выполнять по данным наблюдений за стационарным режимом подземных вод (при $W = 0$) по створу скважин, заложенных на основной водоносной, горизонт по нормали к урезу водоема (рис. 4.7). Значение обобщенного показателя ΔL определяется из условия постоянства расхода потока на участке створа наблюдательных скважин по формуле (обозначения см. на рис. 4.7)

$$\Delta L=\frac{h_1-h_0}{h_2-h_1}\cdot l_{1-2}-l_{0-1}. \qquad (4.10)$$

Величину инфильтрационного питания W, или параметр W/K, можно определить по данным о положении уровня в трех наблюдательных скважинах створа (например, в скважинах 1, 2 и 3 при условии W = const, рис. 4.7) из выражения

$$\frac{W}{K}=\frac{h_2^2-h_1^2}{(l_{1-2}-l_{1-2})l_{1-2}}+\frac{h_1^2-h_3^2}{(l_{1-3}-l_{1-2})l_{1-3}}. \qquad (4.11)$$

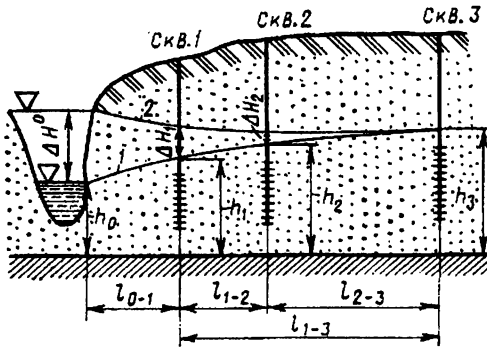


Рис. 4.7. Схема к определению параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод: 1— стационарное положение УГВ; 2 — положение УГВ при подпоре

Определение величины инфильтрационного питания возможно также на основе уравнений неустановившегося подпора, учитывающих наличие инфильтрации по значениям изменения уровня в двух точках (при известных значениях параметров (μ и a) аналогично вышеизложенному.

Глава 4.6. ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ХИМИЧЕСКОГО, ГАЗОВОГО И БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Работы по изучению и оценке физических свойств, химического (в том числе и газового) и бактериологического составов подземных вод выполняются на всех стадиях гидрогеологических исследований. Состав и объемы лабораторных исследований зависят от целевого назначения, характера и стадии выполняемых гидрогеологических исследований. Основная цель таких исследований – изучение физических свойств, химического, газового и бактериологического составов подземных вод – обеспечивается проведением в полевых и стационарных условиях соответствующего комплекса лабораторных анализов (полевых, сокращенных, полных, бактериологических, специальных) и отдельных определений. Комплекс лабораторных исследований должен обеспечить успешное решение задач по выявлению и изучению закономерностей формирования и распространения подземных вод различного состава, всестороннюю оценку качества различных типов подземных вод и возможностей их использования в народном хозяйстве, оценку возможного отрицательного влияния подземных вод на различные инженерные сооружения и оборудование, на условия строительства и мелиоративное состояние земель, выявление и оценку перспектив изучаемой территории на различные виды полезных ископаемых и решение других задач гидрогеохимических построений.

Основными объектами лабораторных исследований являются подземные воды всех изучаемых при поисково-разведочных работах гидрогеологических объектов (водоносных пластов, горизонтов, комплексов). Отбор проб воды из этих объектов осуществляется при гидрогеологическом обследовании и опробовании естественных и искусственных водопроявлений (мочажин, источников, скважин, колодцев, шурфов, ручьев и др.) в процессе съемочных работ, при пробных, опытных и опытно-эксплуатационных откачках, временных и стационарных режимных наблюдениях. Дополнительными объектами лабораторного изучения могут быть подземные воды смежных с изучаемыми водоносных горизонтов (комплексов), почвенные вытяжки, поровые растворы, воды поверхностных водотоков и водоемов, атмосферные осадки.

Физические свойства воды. При изучении проб воды (нередко непосредственно в полевых условиях) в первую очередь устанавливаются физи-

ческие свойства вод изучаемого объекта, к которым относятся: температура, прозрачность, мутность, осадок, цвет, запах, вкус и привкус, плотность. При необходимости дополнительно определяются сжимаемость, вязкость, электропроводность и радиоактивность воды.

Температура воды замеряется с помощью родниковых и ленивых термометров, электротермометров и термоэлементов непосредственно в источниках, колодцах, скважинах. Прозрачность, мутность, осадок, цвет, запах, вкус и привкус определяются с помощью простейших приспособлений, стандартных шкал и органов обоняния общеизвестными методами. Плотность ориентировочно определяют с помощью ареометра, точно — с помощью пикнометра. Результаты определения плотности выражаются в виде отношения массы исследуемой воды при данной температуре к массе равного объема дистиллированной воды при той же температуре или температуре 4 °С.

Сжимаемость воды, характеризуемая коэффициентом упругого сжатия $\beta_в$, определяется в специальных приборах типа стабилометров. Необходимость в ее определении возникает при оценке упругоемкости пласта и коэффициента пьезопроводности расчетным методом.

Необходимость в определении вязкости воды, характеризуемой коэффициентами динамической η и кинематической вязкости ν, возникает при изучении вод глубоких структурных горизонтов, имеющих переменный состав (плотность и вязкость). Вязкость определяется специальными приборами — вискозиметрами, позволяющими осуществлять измерения в условиях, близких к пластовым. Ориентировочно она определяется по специальным графикам и номограммам в зависимости от температуры воды и количества растворенных в ней солей.

Электропроводность воды, характеризуемая удельным электрическим сопротивлением, измеряется с помощью специальной двухконтактной установки при частоте питающего тока 1 000 Гц. Этот показатель изменяется для подземных вод от 0,02 до 1 Ом ·м и используется для соответствующей интерпретации каротажных диаграмм.

Химический и газовый состав воды. Природные воды являются растворами сложного состава, содержащими значительное количество химических элементов в виде ионов, недиссоциированных молекул (в том числе газов) и коллоидов. По данным многочисленных химических анализов в природных водах установлено более 60 элементов (гидрогенические элементы), однако большинство их присутствует в очень незначительных количествах. В связи с этим при анализе химического состава подземных вод обычно выделяют макрокомпоненты, встречающиеся в подземных водах в относительно повышен-

ных концентрациях, и микрокомпоненты, содержание которых в воде обычно незначительно. Макрокомпоненты обусловливают в основном минерализацию подземных вод, их плотность, физические свойства и химический состав, в связи с чем они подлежат определению почти при всех видах химических анализов. Среди макрокомпонентов обычно определяются Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{3+} (региональные макрокомпоненты, присутствующие во многих типах вод), а также органические вещества, соединения азота (главным образом нитрат-ион NO_3^-), кремнекислота, Fe и Al, присутствующие в отдельных типах вод и относящиеся к локальным макрокомпонентам Микрокомпоненты (кроме некоторых токсических) определяются при полных химических анализах воды и при специальных гидрогеохимических исследованиях.

К числу важнейших показателей, определяющих состояние и многие свойства воды, относятся показатель концентрации водородных ионов pH и окислительно-восстановительный потенциал Eh. pH определяется при всех видах лабораторных исследований с помощью универсальных индикаторов, стеклянных электродов и другими методами. Окислительно-восстановительный потенциал Eh определяется при специальных гидрогеохимических исследованиях (предпочтительнее непосредственно у объекта опробования) для выявления условий миграции отдельных микрокомпонентов.

В результате изучения химического и газового состава подземных вод устанавливаются такие важные их показатели, как минерализация (сухой остаток), жесткость, щелочность, агрессивность воды по отношению к бетону и металлам (углекислотная, выщелачивания, общекислотная, сульфатная, магнезиальная, кислородная), окисляемость, галоидопоглощение, содержание нафтеновых кислот, фенолов, токсических элементов и некоторые другие, которые необходимы при оценке качества воды для народнохозяйственного использования в различных отраслях.

Типы химических анализов воды при гидрогеологических исследованиях. Для изучения физических свойств, химического и газового состава подземных вод в процессе гидрогеологических исследований выполняются полевые, сокращенные, полные и специальные анализы, различающиеся условиями выполнения, количеством и точностью определений.

Полевые, сокращенные и полные типы анализов применяются для изучения и общей характеристики состава и свойств подземных вод. Специальные анализы (спектральные, экстракционно-колориметрические, полярографические, газовые, радиохимические, изотопные и др.) выполняются при специальных гидрохимических исследованиях и оценке качества промышленных и минеральных вод.

Полевой анализ проводится в полевых условиях с помощью полевых гидрохимических лабораторий при массовых определениях для предварительной характеристики вод района (при поисково-съемочных работах). Он включает определение физических свойств, pH, Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^-, NO_3^-, HCO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, CO_2, H_2S, O_2, вычисление $Ma^+ + K^+ + Mg^{2+}$ или Ca^{2+}, карбонатной жесткости, общей минерализации.

Сокращенный анализ выполняется более точными методами в стационарных лабораториях. Дополнительно к полевому он включает определение Fe_3^+, NH_4^+, NO_2^-, H_2SiO_3 окисляемости, сухого остатка, CO_2 агрессивной, общей жесткости. При сокращенном анализе обеспечивается контроль анализа по сухому остатку, поэтому он используется при изучении подземных вод на стадиях поисков (для контроля полевых анализов) и предварительной разведки.

Полные анализы проводятся для детальной характеристики подземных вод изучаемых объектов (обычно на детальной, реже на предварительной стадиях разведки). Они включают экспериментальное определение всех макрокомпонентов, выполняются более точными методами и обеспечивают проведение контроля определений по сухому остатку и по суммам миллиграмм-эквивалентов катионов и анионов.

При *специальных* гидрогеологических и гидрохимических исследованиях (оценка перспектив территории на обнаружение минеральных и промышленных вод, нефти, газа и других месторождений) необходимы определения состава спонтанных и растворенных газов (H_2S, CO_2, O_2, CH_4, N_2, Ar + Kr + Xe, He-Ne, тяжелые углеводороды), органических веществ, а также комплекса микрокомпонентов, образующих водные ореолы рассеяния.

Результаты всех химических анализов выражаются в ионной форме (содержание определяемых ионов в мг/л), являющейся исходной для всех определений. Для получения более полного представления о химическом составе изучаемых вод и сопоставления анализов используются миллиграмм-эквивалентная и процент-эквивалентная формы выражения результатов анализа.

Бактериологический состав подземных вод. Бактериологические исследования воды проводятся с целью санитарной оценки возможных источников водоснабжения, установления мероприятий по обеззараживанию воды и решения некоторых других специфических задач (бактериальная разведка на нефть и газ, оценка интенсивности биохимических процессов и др.).

Санитарное состояние воды, определяемое ее фекальной загрязненностью, контролируется и оценивается по косвенным показателям: по степени общего бактериального загрязнения (определяется общим количеством бактерий в 1 мл исследуемой воды) и по содержанию в воде бактерий группы

кишечной палочки (определяется количеством кишечных палочек в 1 л воды — коли-индексом или объемом воды, приходящимся на одну кишечную палочку — колититром). Согласно ГОСТ 2874-82 общее число микроорганизмов в 1 $см^3$ воды хозяйственно-питьевого назначения не должно превышать 100, коли-индекс не более трех. При несоответствии санитарного качества воды указанным требованиям она подлежит обеззараживанию.

Количество проб, отбираемых на бактериологический анализ, устанавливается по согласованию с органами Госсанинспекции. При детальной разведке месторождений подземных вод и оценке их эксплуатационных запасов для водоснабжения пробы на бактериологический анализ должны отбираться из всех водопунктов, используемых при подсчете запасов.

Глава 4.7. ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ОТБОРА ПРОБ ВОДЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Определенная специфика отбора проб воды соблюдается при опробовании минеральных, промышленных и термальных подземных вод, при опробовании источников и скважин, при отборе проб газа, газирующих вод и при специфических видах опробования (бактериологический, радиохимический, изотопный, микрокомпонентный и другие виды анализов).

При отборе проб воды должны быть соблюдены условия, исключающие влияние элементов случайности: химическая чистота посуды, сохранность естественного солевого и газового состава воды, недопустимость застойности и загрязнения воды при отборе, достаточный объем пробы (0,5–1 л воды на полевой и сокращенный анализы, 1–2 л на полный и специальные), недопустимость смешения вод различных водоносных горизонтов, соответствующая консервация и регистрация проб и т. п. Выполнение всех анализов и определений должно осуществляться в короткий срок после отбора проб, а при возможности – на месте их отбора.

Пробы воды из источников, колодцев и открытых водоемов при небольшой их глубине отбираются непосредственно в бутылки с соблюдением соответствующих предосторожностей. При глубине отбора проб до 12–15 м можно использовать псевдобатометр Верещагина. Из более глубоких скважин вода отбирается на изливе (при откачках), с помощью желонок, приборов, специальных пробоотборников, испытательных снарядов и инструментов.

Пробы газа отбираются с помощью газоотводных трубок, воронок, газоотделителей и пробоотборников, специальных конструкций.

Для изучения изменений химического и бактериального состава воды или подтверждения их неизменности во времени необходимо выполнять периодические контрольные определения, частота которых устанавливается с учетом конкретных условий изучаемых объектов.

Требования предъявляются к физическим свойствам, химическому и бактериологическому составу воды и зависят в основном от характера использования воды в народном хозяйстве или объекта ее отрицательного воздействия (хозяйственно-питьевое, производственно-техническое, лечебно-питьевое, горячее водоснабжение, орошение, извлечение солей и ценных для промышленности компонентов, горно-техническое строительство и т. п.), особенностей технологии водопотребляющих предприятий, условий водоснабжения и других факторов. Требования, предъявляемые к качеству воды, чрезвычайно

разнообразны и могут изменяться во времени (изменение или совершенствование технологии работы предприятия, изменение кондиционных требований на промышленные, минеральные и термальные воды и т. д.).

При разрешении каждого конкретного задания для качественной оценки подземных вод руководствуются требованиями, установленными соответствующими ГОСТами, различными ведомственными нормами, техническими условиями, правилами, кондиционными требованиями.

При оценке подземных вод как источников хозяйственно-питьевого водоснабжения руководствуются требованиями ГОСТов.

Органолептические свойства должны соответствовать следующим требованиям: запах (при 20 °С и при нагревании до 60 °С) не более 2 баллов, привкус при 20 °С — не более 2 баллов, цветность не более 20°, мутность по стандартной шкале — не более 1,5 мг/л, запах и привкус при хлорировании — не более 1 балла.

Раздел 5. ИЗЫСКАНИЯ ГРУНТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глава 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Песчано-гравийное сырье представляет собой рыхлые природные скопления более или менее окатанных обломков горных пород и минералов различного размера. Они образовались в результате разрушения различных горных пород природными процессами выветривания, переноса текучими водами (ледниками, волнами) и неоднократного переотложения.

В горном деле и промышленности строительных материалов фракции размером до 5 мм относят к пескам, 5–70 — к гравию, крупнее 70 — к валунам. К песчано-гравийному сырью относят смеси, содержащие не менее 10% гравийных фракций и не менее 5% песчаных. К пескам относят смеси с содержанием гравийных фракций до 10%, а к гравию (галечнику) — с содержанием песка от 5 до 90%.

Песчано-гравийное сырье большей частью подвергают рассеву на стандартные фракции: гравий рядовой, гравий фракционированный и песок-отсев. Валуны и крупный гравий перерабатывают дроблением на щебень более мелких фракций.

Месторождения песчано-гравийного сырья имеют широкое, хотя и не повсеместное, распространение. В России учтено 1269 месторождений с запасами по сумме промышленных категорий почти 10 млрд. $м^3$. Разрабатывают около 600 месторождений с годовой добычей 130–190 млн. $м^3$.

В северном регионе европейской части России запасы сырья составляют 32% от общероссийских, добыча — 36%. На Северо-Кавказский регион приходится около 15% запасов и добычи сырья. В Уральском регионе сосредоточено 17% запасов, добыча составляет 32%. Всего в европейской части России добывают более 80% сырья (около 60% запасов).

Природный кварцевый песок — мелкообломочная рыхлая осадочная горная порода, более чем на 90% состоящая из окатанных и угловатых зерен (песчинок) кварца с преобладающим размером 0,1–1,0 мм. Кварцевые пески характерны для платформенных районов и обычно образуются как в условиях влажного жаркого климата в результате переотложения продуктов глубокого химического выветривания материнских пород, так и вне связи с клима-

том при длительном переотложении их различными природными агентами, а также при формировании осадков за счет размыва более древних кварцевых песков или песчаников.

По размерам частиц (мм) выделяют пески: крупнозернистые (0,5–1), среднезернистые (0,25–0,5) и мелкозернистые (0,1–0,25).

Форма зерен песка бывает округлая, округло-угловатая и угловатая; по степени окатанности — окатанная, полуокатанная и остроугольная; по характеру поверхности — зерна гладкие и шероховатые.

Строительные камни представляют обширную группу нерудных полезных ископаемых, занимающих по объемам потребления одно из первых мест в строительном производстве. Являясь инертными материалами, они включают пильные (стеновые) и облицовочные камни и наряду с песками и песчано-гравийными смесями составляют главный комплекс природных строительных материалов, используемых в естественном состоянии без применения термохимической обработки.

Под строительными камнями понимаются скальные горные породы, перерабатываемые на различные материалы (монолиты, блоки, плиты, щебень, песок дробления и др.) механическим путем: дроблением, распиловкой, фракционированием и т. п. В качестве строительных камней используют горные породы разного происхождения: интрузивные, эффузивные, осадочные, метаморфические. В большинстве случаев минеральный состав горных пород не имеет существенного значения, определяющими являются физико-механические свойства, зависящие не столько от состава, сколько от структуры и текстуры пород. В наибольших количествах применяют карбонатные породы, граниты и сходные с ними горные породы. Реже используют габброиды, базальтоиды, песчаники.

Инертные строительные материалы, получаемые при переработке строительных камней, в преобладающей массе используют в качестве заполнителей тяжелых бетонов. Бетонами называются искусственные материалы — конгломераты, состоящие на 80–85% из мелких и крупных заполнителей и соединяющего их вяжущего материала — портландцемента, битума и других, в результате твердения которого получается монолитная камнеподобная масса.

Области применения

Песчано-гравийное сырье в основной массе применяют в строительном производстве преимущественно после переработки (фракционирования, дробления).

Природную песчано-гравийную смесь используют в относительно небольших объемах (менее 10%) для различных отсыпок, нивелировок, дамб, где не предъявляют строгих требований к качеству материала.

Гравий фракционированный выпускают в виде основных фракций (мм): 5(3)–10, >10–20, >20–40, >40–80(70) и 5(3)–20. Используют эти материалы преимущественно в качестве крупного заполнителя в бетонах и асфальтобетонах. В них вместе с мелким наполнителем — песком — гравий составляет 70–80% объема бетона.

Так же используется и щебень, полученный дроблением крупного гравия, гальки и валунов. Недробленые валуны иногда находят применение в качестве бутового камня.

Песок-отсев после дробления или классификации из состава песчано-гравийной смеси крупностью до 5(3) мм используют в строительных растворах и вместе с крупным заполнителем в тяжелых бетонах. Реже его используют для производства автоклавных материалов.

Обогащенную песчано-гравийную смесь, или гравий, применяют в качестве балластных дорожных отсыпок, балластировки железнодорожных путей, фильтрационных экранов и т. п.

Бутовый камень (бут) — камень неправильной формы размером более 140 мм, используется для кладки фундаментов, стен нежилых зданий и других сооружений в качестве заполнителя бутобетона при возведении массивных сооружений (плотины, молы, дамбы и др.), а также для отмосток при дорожном строительстве и других работах. Выпуск бутового камня на карьерах строительных камней составляет около 5% к объему всей товарной продукции.

Штучные камни представляют собой изделия правильной геометрической формы с обработанными поверхностями. Основной вид такой продукции — бортовые камни, предназначаемые для выделения проезжей части дорог, въездов, тротуаров. Брусчатые камни (брусчатка) — весьма долговечный материал для дорожных покрытий.

Прочие виды штучных изделий: архитектурно-отделочные детали, парапеты, ступени, плиты подоконные, накрывочные, цокольные и облицовочные, а также промышленные каменные изделия (валы, бегуны, жернова) для карьеров строительных камней не специфичны, так как требуют особых приемов разработки. Они производятся преимущественно на карьерах облицовочных камней и специальных предприятиях.

Пильные камни — блоки стандартного размера — вырезаются дисковыми фрезами непосредственно в массиве горной породы. Представляют они эффективный стеновой материал, используются также для изготовления тонких

армированных перегородок, перемычек. Дома из пильного камня отличаются повышенными звуко- и теплоизоляционными свойствами и не требуют ремонта внешних стен.

Щебень — наиболее массовый продукт, его выпуск составляет обычно 85–95% от объема всей товарной продукции. Щебень выпускается разделенным на фракции (мм): 5(3)40; 10–20; 20–40; 40–80 (70–140). Щебень используют:

- в качестве основного заполнителя (тяжелого) бетона во всех бетонных и железобетонных строительных конструкциях;
- в качестве крупного заполнителя асфальто- и цементобетона и балластного слоя покрытий, автомобильных дорог и аэродромов;
- для балластировки железнодорожных путей;
- для всякого рода отсыпок, отмосток, планировочных работ.

Для легких бетонов используют щебень, полученный из пористых горных пород, а также искусственные пористые материалы, обычно керамзит, реже термолит, металлургические и топливные шлаки и др. Искусственные пористые заполнители, в особенности вермикулит и перлит, являются лучшим материалом для звуко- и теплоизоляции.

Дробленый песок-отсев используют в качестве заполнителя совместно с щебнем в бетонных (и асфальтобетонных) смесях и самостоятельно в штукатурных и кладочных растворах, а также во всякого рода балластных и планировочных отсыпках. Выход этого материала около 3–5%.

Щебень и дробленый песок, обладающие декоративными свойствами, используют для отделки фасадов и интерьеров сооружений, укладки мозаичных полов.

Тонко измельченный минеральный порошок, преимущественно карбонатных пород, служит компенсирующим наполнителем в асфальтобетонных смесях, чисто карбонатный порошок применяют для известкования почв. Некоторую часть щебня известняков используют на строительную и технологическую известь для обжига.

Кварцевый песок используют в различных отраслях промышленности как в природном виде, так и в качестве сырья для производства широкого ассортимента изделий, в литейном деле, строительной, цементной, химической промышленности, в производстве фарфора-фаянса, динаса, кирпича, бетона асфальтовых смесей, кровельных рулонных материалов, абразивов, фильтров, в дорожном и железнодорожном хозяйстве, при испытании цементов, для песочниц локомотивов, производства карбида кремния, изоляторов и т. д.

Кварцевое сырье используют в качестве наполнителя неармированных бетонов, тампонажных портландцементов, предназначенных для цементации нефтяных и газовых скважин, цементов для строительных растворов.

Промышленные типы месторождений

Образование залежей песчано-гравийного сырья связано с деятельностью ледников и водных потоков. В процессе таяния ледника образовались различные приледниковые накопления плохо сортированного материала: камы — беспорядочно разбросанные конусовидные купола, озы — узкие, извилистые холмы, местами переходящие в купола, зандры — обширные конусы выноса.

Большинство месторождений рассмотренных типов сырья связано преимущественно с четвертичными, реже неогеновыми, палеогеновыми и, как исключение, с более древними экзогенными образованиями.

Подразделение месторождений по размерам запасов (млн. $м^3$): очень крупные — более 30, крупные — 30–15, средние — 15–10, мелкие — 10–2, очень мелкие — менее 2.

Месторождения кварцевых песков известны в отложениях различного возраста — от кембрия до современных включительно. В зависимости от условий образования выделяют морские (прибрежно-морские), озерные, аллювиальные, водно-ледниковые, элювиальные и эоловые типы месторождений. Месторождения песков морского и озерного происхождения связаны с современными морями и крупными озерами или образовались в результате деятельности древних водных бассейнов.

Промышленные типы месторождений горных пород, используемых в качестве сырья для производства строительных камней и заполнителей бетона, охарактеризованы в таблице 5.1.

Крупнейшие месторождения кварцевых песков, приуроченные к морским и озерным отложениям, разведаны в Центральном регионе России, Среднем и Нижнем Поволжье, Западной Сибири. Они широко распространены на побережьях морей — Балтийского, Каспийского, Японского, Охотского, и озер — Онежского, Ладожского и др. На прибрежно-морские приходится до 30% месторождений кварцевых песков России и примерно такое же количество запасов.

Аллювиальные месторождения Российской Федерации составляют свыше 60%, водно-ледниковые — 10, эоловые — 2, элювиальные и делювиальные — около 1.

Месторождения аллювиального типа (современные и древние) широко распространены во всех регионах страны. По сложности геологического строения морские, озерные и аллювиальные месторождения соответствуют 1-й и 2-й группам сложности.

Водно-ледниковые месторождения довольно широко встречаются в северных и центральных районах европейской части Российской Федерации и на севере Западной Сибири. Пески преимущественно кварцевые и полево-

Таблица 5.1

Промышленные типы месторождений горных пород, используемых для производства строительных камней и заполнителей бетонов

Типы	Формы продуктивных тел	Продуктивные породы	Генетические типы	Размеры, м		Примеры эксплуатируемых месторождений
				в плане	мощность	
Крупные массивы	Батолиты, крупные штоки	Гранитоиды	Магматогенные-интрузивные	Тысячи		Каменногорское (Мурманская обл.); Смолинское (Урал)
Штоки, мощные жилы и дайки, купола	Штокообразные тела	Габброкулы		Сотни		Гусевогорское (Урал)
	Рифы	Известняки	Биогенные	Сотни	Десятки и сотни	Шах-Тау (Башкирия)
Пласты, пластообразные залежи	Покровы, потоки	Базальтоиды, туфы вулканические	Магматогенно-эффузивные	Тысячи	До сотен	Кайерканское (Красноярский край); Октемберянское (Армения)
	Толщи	Мраморы, кварциты	Параметаморфогенные			Слюдянское (Иркутская обл.); Шокшинское (Карелия)
	Слои	Карбонатные породы, песчаники и др.	Седиментогенные			Мелехово-Федотовское (Владимирская обл.); Аникинское (Ростовская обл.)

шпат-кварцевые. По сложности геологического строения они в большинстве своем соответствуют 2-й группе сложности.

Месторождения песков элювиального и делювиального типов в связи с их большей частью невыдержанностью состава и строения полезной толщи, плохой сортированностью и неокатанностью материала, значительным содержанием глинистых и пылеватых частиц имеют ограниченное промышленное значение. В большинстве своем их относят к 3-й и 4-й группам сложности.

Пески эоловые характерны для континентальных образований аридных, семиаридных климатов, морских, озерных, речных песчаных побережий разных географических широт. Представлены эоловые месторождения дюнами, барханами, грядами, буграми, реже линзообразными залежами, сложены песками мелко- и среднезернистыми (преобладают фракции 0,15-0,30 мм), хорошо окатанными, однородными по минеральному составу. Содержат незначительные примеси. Использование в промышленности, за исключением стекольного и литейного производств, ограниченно. Их относят в основном ко 2-й группе по сложности геологического строения.

По величине запасов ($м^3$) месторождения кварцевых песков подразделяют: на уникальные — сотни, весьма крупные — десятки, крупные — единицы миллионов, средние — сотни, мелкие — десятки, очень мелкие — единицы тысяч.

Разработка месторождений

Разработку месторождений песчано-гравийного сырья ведут открытым способом. В зависимости от горно-технических условий применяют следующие способы горных работ: гидравлический (гидромеханизированный), бульдозерно-скреперный и экскаваторный.

На подводных месторождениях применяют только гидродобычу с использованием плавучих земснарядов гидравлического и механического действия. К первым относят землесосные снаряды — рефулеры, производительность которых по породе — до 2 500 $м^3/ч$ при глубине разработки до 12–30 м. Минимальная мощность разрабатываемого пласта составляет 2,5–6,5 м в зависимости от производительности.

Земснаряды механического действия (многочерпаковые) имеют производительность до 600 $м^3/ч$ при глубине черпания 5,5–18 м. Минимальная мощность пласта 2–6 м. К одночерпаковым снарядам относят плавучие краны с грейферными черпаками емкостью от 1,5 до 4,5 $м^3$. Их производительность 100–210 $м^3/ч$ при глубине черпания 13–23 м. Максимальный размер валунов, доступных разработке, зависит от производительности снаряда и колеблется в пределах 100–300 мм. Для черпаковых снарядов он должен быть объемом не более половины емкости ковша. Добытый грунт грузят на баржи или по плавучему трубопроводу подают непосредственно на берег.

Использование перечисленных средств возможно и при разработке наземных пойменных месторождений при высоком уровне грунтовых вод. Если вскрыша не обводнена, ее снимают бульдозерами или экскаваторами. Земснаряд проводят по прорабатываемому им же каналу от ближайшего русла реки.

Для работы землесосов обеспечивают приток воды не менее 0,5 м^3 на 1 м^3 добытой породы. Землесосным снарядам доступны породы с содержанием валунов не более 4%. При большем их содержании применяют черпаковые снаряды.

Гидравлический способ добычи с помощью гидромониторов применяют редко — лишь при наличии естественного уклона залежи, обеспечивающего самотечную транспортировку разжиженной породы (пульпы).

Сухие и малообводненные месторождения разрабатывают экскаваторами различной мощности и класса, бульдозерами и скреперами. На крупных месторождениях с небольшим содержанием валунов используют роторные экскаваторы в комплексе с перегружателями и ленточными транспортерами. Глубина разработки достигает 30 м.

Во всех случаях, когда есть возможность выбора способа разработки, выполняют технико-экономический расчет для определения наиболее экономичного способа.

Месторождения глин разрабатывают преимущественно открытым способом. Благодаря этому глины длительное время подвергаются воздействию атмосферных агентов, становятся рыхлыми и легче отделяются от горной массы.

Очистные работы в карьерах производятся ковшовыми и реже роторными экскаваторами. Глубина карьеров достигает 50 м. Добытая глина доставляется на переработку преимущественно железнодорожным транспортом.

Потери полезного ископаемого достигают 5%, разубоживание незначительное.

Разработка ряда типов глин вызывает трудности вследствие их набухаемости и способности образовывать с водой гели. Поэтому их разрабатывают только в сухое время года. Грунтовые и подземные воды создают трудности в разработке глинистого сырья, поскольку их добыча требует обязательного проведения комплекса дренажных работ.

Подземная разработка месторождений изредка применяется для огнеупорных и слабонабухающих щелочноземельных бентонитов, поскольку сильное набухание глин приводит к разрушению крепления и другим осложнениям ведения горных работ.

Разработка месторождений пород для производства строительных камней и заполнителей бетона осуществляется в подавляющем большинстве открытым способом (карьеры). Подземная разработка штольнями и шахтами применяется в основном при добыче пильного камня.

Карьеры по объемам добычи горной массы (тыс. м^3 в год) подразделяются на: мелкие — до 700, средние — от 700 до 2 000, крупные — свыше 2 000.

Разработка карьерами ведется по общепринятым технологическим схемам одним или несколькими добычными уступами. Для отбойки и рыхления скальных пород применяют буровзрывные работы с использованием аммиачно-селитряных, селитряно-тротиловых и других взрывчатых веществ. Заряды закладывают в скважины, пробуренные с поверхности уступа. Для разделки негабаритных пород используют шпуры. На мелких карьерах при добыче бутового камня иногда применяют ручную выборку.

Транспортировку горной массы на дробильно-сортировочные фабрики производят автосамосвалами. Эксплуатационные потери горной массы при взрывных работах не превышают 0,5%.

Производство штучных изделий на карьерах, где применяют бризантные взрывчатые вещества, ограничено развитием в массиве микротрещиноватости, ведущей к разрушению изделий.

При открытом способе разработку месторождений пильных камней производят с помощью камнерезных машин с дисковыми или кольцевыми фрезами. При подземной добыче применяют дисковые или баровые машины.

Глава 5.2. СОСТАВ ИЗЫСКАНИЙ ГРУНТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Настоящий раздел устанавливает общие технические требования к выполнению следующих видов работ и исследований, входящих в состав изысканий грунтовых строительных материалов:

сбор, обобщение и использование имеющихся фондовых материалов изысканий прошлых лет;

дешифрирование космо- и аэрофотоматериалов;

маршрутные наблюдения (рекогносцировочное обследование);

проходка горных выработок;

геофизические исследования;

опытные полевые работы;

гидрогеологические исследования;

отбор проб грунтовых строительных материалов;

стационарные наблюдения;

лабораторные исследования проб грунтовых строительных материалов;

опытно-производственные исследования с участием строительных организаций;

обследование земляных сооружений;

работы и исследования в составе других видов инженерных изысканий;

камеральная обработка материалов;

составление технического отчета (заключения).

Необходимость выполнения отдельных видов работ и исследований устанавливается в программе изысканий в зависимости от вида и назначения проектируемого сооружения в соответствии с техническим заданием заказчика.

Сбор и обобщение имеющихся фондовых материалов изысканий прошлых лет выполняется на первом этапе изысканий грунтовых строительных материалов для составления программы изысканий и их оптимальной организации.

Сбору, обобщению и использованию подлежат:

- сведения о действующих и законсервированных карьерах по добыче различных видов грунтовых и местных строительных материалов, об их принадлежности, производительности, качестве, использовании, возможности и условиях их получения;
- технические отчеты о выполненных изысканиях грунтовых строительных материалов и геологоразведочных работах на местные строительные материалы прошлых лет (в том числе на основе геолого-съемоч-

ных и инженерно-геологических работ, региональных исследований и режимных наблюдений организаций МПР России и других ведомств) и сведения об имеющихся, производимых или планируемых в будущем различных отходах и отвалах, их количестве, качестве, использовании и условиях получения;
- материалы инженерно-геологических изысканий, гидрогеологических и геофизических исследований и стационарных наблюдений;
- данные обследований земляных сооружений и об опыте их строительства и эксплуатации;
- космо- и аэрофотоматериалы;
- топографические планы и карты.

По результатам сбора, обобщения и анализа указанных материалов в программе (предписании) изысканий и техническом отчете (заключении) должна быть дана оценка их качества, достоверности, степени изученности и возможности использования этих материалов для решения соответствующих проектных задач.

Дешифрирование космо- и аэрофотоматериалов, как правило, следует выполнять при изысканиях грунтовых строительных материалов для возведения крупных земляных сооружений, в том числе линейных сооружений значительной протяженности, с целью обоснования разработки предпроектной документации.

Оптимальными масштабами аэрофотоснимков следует считать 1:25 000 (1:20 000), 1:15 000 (1:17 000), 1:10 000 (1:12 000), целесообразно использовать также имеющиеся материалы аэрофотосъемок в масштабах 1:5 000, 1:2 000.

Маршрутные наблюдения при рекогносцировочном обследовании выполняются для решения следующих задач: предварительного установления границ расположения перспективных площадок — источников получения грунтовых строительных материалов, их хозяйственного использования, возможных путей транспортировки строительных материалов, уточнения и дополнения данных изысканий прошлых лет, результатов дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, выявления опасных геологических и инженерно-геологических процессов, осложняющих разработку грунтовых строительных материалов, изучения других компонентов геологической среды, а также выбор мест проходки горных выработок.

Маршрутные наблюдения следует выполнять при изысканиях для предпроектной документации с использованием имеющихся топографических, геологических и других карт.

При изысканиях для проекта и рабочей документации маршрутные наблюдения выполняются на отдельных участках площадок с целью уточнения данных, полученных на предыдущих стадиях изысканий.

Количество маршрутов, их направления и состав работ необходимо устанавливать в программе (предписании) изысканий с учетом изученности территории, стадии (этапа) проектирования и сложности горно-геологических условий (приложение 1).

Проходку горных выработок следует рассматривать в качестве основного вида работ и осуществлять при выполнении изысканий для каждой стадии (этапа) проектирования с целью решения следующих основных задач:

- установления условий залегания полезной толщи грунтовых строительных материалов;
- установления условий залегания вскрышных пород;
- отбора всех видов проб грунтовых строительных материалов;
- установления условий залегания подземных вод, зон и характера проявления геологических и инженерно-геологических процессов;
- выполнения опытных полевых работ, стационарных наблюдений и геофизических исследований.

При изысканиях грунтовых строительных материалов виды, глубину и назначение горных выработок следует принимать в соответствии с требованиями, установленными для инженерно-геологических изысканий (СП 11-105-97, приложение В). При этом шурфы, дудки и скважины большого диаметра рекомендуется использовать при изысканиях неоднородных материалов, представленных крупнообломочными грунтами или отходами с крупными включениями.

Размещение горных выработок необходимо производить с учетом группы сложности горно-геологических условий (приложение 1), стадийности проектирования и характера залегания грунтовых строительных материалов.

Расстояние между выработками следует принимать в соответствии с таблицей 5.2.

Таблица 5.2

Группа сложности горно-геологических условий	Расстояние между горными выработками, м		
	Предпроектная документация	Проект	Рабочая документация
I	800–400	400–200	200–100
II	600–300	300–150	150–75
III	400–200	200–100	100–50

Примечания

1. Расстояния между горными выработками (минимальные, максимальные и промежуточные) в каждом конкретном случае необходимо устанавливать в программе изысканий с учетом требований технического задания, природных условий, групп сложности горно-геологических условий, способов разработки и др.
2. Отступления в сторону сокращения расстояний между горными выработками допускаются при изысканиях на небольших участках и при III группе сложности горно-геологических условий.

Рекомендуется применять следующие сетки размещения выработок в плане:

- квадратную — при простом геологическом строении и малой изменчивости мощности и качества полезной толщи в плане;
- прямоугольную — при вытянутой в плане форме полезной толщи (аллювиальные, пролювиальные отложения, озы, камы и т. п.);
- неправильную — при сложных природных условиях, а также при изучении отвалов и отходов.

Наименьшие расстояния между выработками рекомендуется принимать по створам, ориентированным по направлениям наибольшей изменчивости мощности и качества полезной толщи.

Глубину выработок следует принимать, как правило, на 1–2 м ниже подошвы полезной толщи или уступа (дна) карьера.

Все горные выработки после окончания изысканий должны быть ликвидированы обратной засыпкой с трамбованием или тампонажем глиной или цементно-песчаным раствором (ниже уровня подземных вод) с целью исключения загрязнения геологической среды и активизации геологических и инженерно-геологических процессов.

При изысканиях грунтовых строительных материалов на площадке для их разработки способом гидромеханизации следует ограничиваться обратной засыпкой выработок.

Геофизические исследования следует применять для решения различных задач при изысканиях грунтовых строительных материалов в соответствии с положениями СП 11-105-97.

Геофизические исследования следует также применять для установления степени радиоактивной загрязненности грунтовых строительных материалов в соответствии с ГОСТ 30108-94.

Опытные полевые работы следует выполнять в сочетании с лабораторными определениями в основном для установления состава, состояния и фи-

зико-механических свойств грунтовых строительных материалов, в том числе корректировки, уточнения и дополнения лабораторных данных в случае их недостаточной представительности и достоверности.

В состав опытных полевых работ входят:

- определение гранулометрического состава и плотности крупнообломочных и песчаных грунтов, отвалов и отходов с содержанием крупных включений;
- определение процентного содержания валунов, глыб и включений размером свыше 200 мм при разработке способом гидромеханизации;
- петрографическая разборка по фракциям с определением слабых разновидностей;
- определение структурной прочности грунтов, засоренности их топляками и пнями при разработке способом гидромеханизации;
- определение уплотняемости насыпных грунтовых строительных материалов.

Гидрогеологические исследования необходимо выполнять для установления условий залегания подземных вод в полезной толще, в том числе глубины залегания подземных вод, колебаний уровня в течение года, фильтрационных свойств водовмещающих пород, изменчивости их в плане и по глубине, гидравлической взаимосвязи с водами других водоносных горизонтов и поверхностными водами.

Гидрогеологические параметры и характеристики грунтов и водоносных горизонтов следует устанавливать, как правило, по лабораторным данным (коэффициент фильтрации грунтов природного сложения и при заданной плотности, коэффициент водоотдачи, высота капиллярного поднятия и др.) и по справочным данным.

В необходимых случаях в соответствии с техническим заданием заказчика следует производить опытно-фильтрационные работы: пробные и опытные откачки из скважин и наливы воды в шурфы в зоне аэрации.

Отбор проб грунтовых строительных материалов **следует относить к основному виду работ и производить при изысканиях для каждой стадии (этапа) проектирования.**

Система опробования должна учитывать изменчивость грунтовой толщи с целью достоверного определения качества грунтовых строительных материалов.

С учетом задач изысканий, стадии (этапа) проектирования и видов грунтовых строительных материалов из горных выработок необходимо отбирать следующие виды проб: образцы пород (монолиты, штуфы), послойные, поин-

тервальные (секционные), групповые (объединенные) и полузаводские (технологические) в соответствии с приложением 2. При этом следует применять следующие способы отбора начальных (первичных) проб: точечный, валовой (послойно-интервальный), бороздовый, задирковый, «кратной бадьи» в соответствии с приложением Е.

До конечной массы проб (приложение 4), направляемых в лабораторию, объем начальных (первичных) проб следует при необходимости сокращать методом квартования или другим способом.

При проходке выработок в грунтовых строительных материалах, содержащих валуны и глыбы (фракции размером более 100 мм), их следует отбирать отдельно из опробуемого слоя или интервала с последующим определением и пересчетом процентного содержания каждой фракции (100-200 мм и более крупные с интервалом через 50 мм).

Стационарные наблюдения при необходимости следует выполнять за развитием геологических и инженерно-геологических процессов и режимом подземных вод, а также при обследовании земляных сооружений.

Состав наблюдений, размещение стационарной сети, периодичность и продолжительность наблюдений следует устанавливать в программе изысканий в соответствии с техническим заданием заказчика.

Лабораторные исследования проб грунтовых строительных материалов необходимо выполнять с целью определения их состава, состояния и физико-механических свойств.

Состав лабораторных определений следует назначать с учетом вида грунтовых строительных материалов, стадии (этапа) проектирования, типа земляных сооружений в соответствии с приложением 5.

Загрязненность грунтовых строительных материалов токсичными химическими элементами и соединениями следует устанавливать в соответствии с требованиями к инженерно-экологическим изысканиям (СП 11-102-97).

Обследование земляных сооружений производится в случае реконструкции, деформации и потери устойчивости сооружений с целью оценки их состояния, а также изучения опыта строительства в соответствии с положениями настоящего Свода правил.

Инженерно-геодезические, инженерно-гидрометеорологические и другие виды инженерных изысканий при изысканиях грунтовых строительных материалов следует выполнять в соответствии с требованиями СНиП и СП.

Топографическую съемку площадок (участков) залегания (размещения) грунтовых строительных материалов следует выполнять в зависимости от

стадии (этапа) проектирования и рельефа местности, как правило, в масштабах 1:5 000–1:1 000 с высотой сечения рельефа через 0,5–2,0 м в соответствии со СНиП 11-02-96 (приложения Б и В) и СП 11-104-97.

Топографическую съемку необходимо также выполнять на прилегающих участках, в пределах которых предусмотрено размещение механизмов, служебных помещений, отвалов вскрышных пород, подъездных путей и осуществление рекультивации земель.

Изыскания грунтовых строительных материалов, разрабатываемых способом гидромеханизации плавучими землесосными снарядами и гидромониторными установками, должны включать необходимые специфические полевые работы и лабораторные определения состава, состояния и свойств грунтов, позволяющих достоверно устанавливать возможность и эффективность использования этого способа разработки и последующей укладки грунтов при строительстве земляных намывных сооружений.

При этом следует:

- выполнять при необходимости исследования по водообеспечению гидромеханизированного способа разработки;
- не размещать проектируемые карьеры вблизи напорных гидротехнических сооружений на расстоянии, меньшем, чем обусловлено расчетами фильтрации и устойчивости откосов сооружений;
- выбирать варианты, которые обеспечивают при прочих равных условиях наименьшую по высоте подачу разрабатываемых грунтовых строительных материалов к месту возведения земляных сооружений;
- выявлять участки с мощностью полезной толщи не менее 3 м при разработке плавучими землесосными снарядами производительностью по грунту до 200 м^3/ч; не менее 5 м — при более крупных земснарядах и не менее 8–10 м при разработке грунта гидромониторным способом;
- исследовать обводненную полезную толщу на глубину от 8 до 30 м ниже уровня подземных вод или водной поверхности водоемов (в зависимости от типов намеченных к применению землесосных снарядов);
- производить проходку выработок на 2 м ниже намеченной глубины разработки земснарядами производительностью по грунту до 200 м^3/ч и на 3 м, соответственно, при использовании более мощных земснарядов;
- выбирать карьеры с коэффициентом вскрыши, как правило, не свыше 0,15–0,25; при большей величине вскрышного слоя целесообразность изысканий должна быть согласована с организацией, выполняющей проектирование земляных работ способом гидромеханизации;

- определять процентное содержание крупных включений в грунте (галька, валуны и т. п.);
- устанавливать характер залесенности деревьями, кустарниками и засоренность грунтов растительными остатками, топляками, пнями;
- определять структурную прочность сложения песчаного и песчано-гравийного грунта, обусловленную наличием цементационных связей;
- определять гранулометрический состав грунта вскрышного слоя и возможность его использования, в том числе с осуществлением технической мелиорации;
- устанавливать наличие в полезной толще прослоек и линз супесей, суглинков и глин, их мощность, определять консистенцию и гранулометрический состав каждой из разностей;
- производить оценку пригодности грунтовых строительных материалов для намыва плотин и дамб по графику с граничными кривыми гранулометрического состава грунта намывных сооружений (п. 3.9 СНиП 2.06.05-84*).

В составлении технического задания заказчика на изыскания грунтовых строительных материалов и согласовании программы изысканий должна принимать участие организация, осуществляющая проектирование земляных работ способом гидромеханизации.

В качестве грунтовых строительных материалов следует использовать имеющиеся отходы и отвалы (СП 11-109-98), в том числе и после их технической мелиорации, при соответствующем обосновании результатами испытаний.

К этому виду грунтовых строительных материалов следует относить:

- топливные (котельные) и металлургические (доменные, мартеновские, медеплавильные и др.) шлаки;
- золы от сжигания твердого топлива;
- отвалы вскрышных пород;
- отвалы горнорудных предприятий;
- отходы обогатительных фабрик;
- драговые отвалы преимущественно песчаных и крупнообломочных грунтов и др.

При исследовании в качестве грунтовых строительных материалов отходов и отвалов, образующихся при различной хозяйственной деятельности, следует устанавливать и отражать в техническом отчете:

- границы площадок размещения отходов и отвалов, мощности и условия их размещения, возраст и способ их образования;

- исходные материнские породы или сырье, состав, состояние, свойства и изменчивость их во времени и пространстве;
- радиационно-гигиеническую оценку (СП 11-109-98);
- способы разработки (переработки), отсыпки пород и отходов, пути и дальность их транспортировки.

По шлакам дополнительно следует определять:

- способ охлаждения — быстрый или медленный;
- химический состав — кислые или основные.

При проходке горных выработок, как правило, следует отбирать послойные и поинтервальные пробы (приложение 2) для определения состава, состояния и свойств материала отвалов и отходов.

Необходимо дополнительно отбирать образцы различных включений и загрязнений.

Качество и однородность отходов допускается оценивать по технологическим характеристикам производства и складирования.

При определении мощности и количества отвалов и отходов следует использовать сохранившиеся до их образования топографические планы (карты) местности.

Виды проб и состав лабораторных определений отвалов и отходов следует устанавливать по аналогии с соответствующими видами минеральных грунтов (скальных, крупнообломочных, песчаных и глинистых) и дополнять специальными видами испытаний (определение специфического загрязнения, цементационных структурных связей, изменение во времени и т. п.).

На территориях развития или возможного возникновения опасных геологических и инженерно-геологических процессов следует проводить соответствующие дополнительные исследования с целью получения исходных данных для проектирования защитных мероприятий и способов ведения работ при добыче грунтовых строительных материалов.

Интенсивность развития, зоны и глубины распространения геологических и инженерно-геологических процессов, приуроченность их к определенным формам рельефа и видам грунтов и другие характеристики следует отражать в отчете в соответствии с требованиями пп. 6.3 и 6.16-6.22 СНиП 11-02-96.

По результатам выполненных изысканий грунтовых строительных материалов следует составлять, как правило, отдельный технический отчет (заключение).

Глава 5.3. ПРОХОДКА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК. БУРЕНИЕ СКВАЖИН

Задача поисковых и разведочных скважин, если разведка ведется буровыми скважинами, заключается в том, чтобы по поднятому на поверхность керну можно было изучить геолого-литологические характеристики толщи и выполнить представительное опробование, результаты которого отражали бы качество известняка, слагающего месторождение.

Геологическая изученность месторождения должна давать правильное представление о его строении, условиях образования и степени фациальной изменчивости карбонатных пород, их закарстованности, трещиноватости, тектонической нарушенности.

Технология бурения скважин должна обеспечивать достаточно высокий выход керна по полезному ископаемому (не ниже 80%). Если полезная толща представлена несколькими слоями различного качественного состава, требования к выходу керна следует отнести отдельно к каждому слою, а не ко всей полезной толще в целом. Слоистые толщи карбонатных пород расчленяются на слои и пачки, которые должны быть изучены и опробованы индивидуально, а также прослежены и сопоставлены во всех пройденных на месторождении выработках. Слоистые толщи должны быть подразделены на фациально-литологические или текстурные разновидности. При разведке должны быть установлены: изменения полезной толщи в зоне контактов с изверженными массивами и жилами; наличие окремнения, вторичной кальцитизации и доломитизации, включений и каверн; зоны дезинтегрированных пород, тектонических нарушений и дробления, трещиноватость, форма и размеры отдельностей; характер и интенсивность выветривания, карстопроявления.

5.3.1. Ударно-канатное бурение. Область применения способа и классификация горных пород по буримости

Ударно-канатное бурение эффективно применяется в районах, характеризующихся сложными геологическими условиями. В практике геологоразведочных работ в основном применяются две разновидности: бурение с опережающим забой креплением обсадными трубами и бурение забивными стаканами. В обоих случаях крепление скважин происходит в процессе бурения, и тем самым исключается привнос частиц вышележащих пород в породы полезной толщи. Геологический разрез пробуренных пород, в том числе глубина вскрытия, мощность и уровень грунтовых вод, отбиваются, как правило,

достаточно точно, что позволяет отбирать пробы со всех прослоев полезной толщи и по результатам опробования судить с большой точностью о качестве. Данный способ бурения обеспечивает получение больших по объему проб. При разведке песчано-гравийных месторождений для отбора технологических проб проходятся шурфы. Однако шурфы с каркасно-металлическим креплением могут быть пройдены по необводненной части разреза до глубины 30 м. При больших глубинах отбор технологических проб можно производить только из скважины большого диаметра. Поэтому ударно-канатное бурение нашло широкое применение при замене проходки шурфов бурением скважин большого диаметра, а также на добуривании шурфоскважин в породах, залегающих ниже уровня грунтовых вод.

По сравнению с другими способами ударно-канатное бурение имеет ряд недостатков. Среди них бурение только вертикальных скважин, низкие скорости, трудоемкость вспомогательных операций. Но при бурении песчано-гравийных и особенно валунно-галечниковых отложений предпочтение отдается ударно-канатному способу.

Для ударно-канатного бурения все породы делят на 7 категорий по буримости (табл.5.3).

Таблица 5.3

Классификация горных пород по буримости для механического ударно-канатного бурения

Категория	Породы	Бурение, м	
		за 1 час чистого бурения	за 1 рейс
I	Торф, растительный слой без древесных корней. Рыхлый чернозем, рыхлые влажные пески. Иловатые породы. Болотные отложения. Рыхлый и влажный лесс. Трепел	7,70	0,50
II	То же с древесными корнями или с мелкой галькой и гравием (до 10%). Рыхлые песчано-глинистые породы с небольшой примесью мелкой гальки и гравия (до 10%). Глины ленточные, пластичные и песчаные. Диатомит. Увлажненный слабый мел. Сажи. Пески средней плотности	4,00	0,50
III	Песчано-глинистые породы и пески средней плотности с примесью мелкого щебня, гальки, гравия (10–20%). Рыхлые мергели. Мел. Плотные глины, пески и суглинки. Слежавшийся лесс. Плывуны и водонасыщенные пески, дающие при бурении «пробки» до 2 м	1,90	0,50

Окончание табл. 5.3

Категория	Породы	Бурение, м	
		за 1 час чистого бурения	за 1 рейс
IV	То же со значительным содержанием щебня, гальки и гравия (20–35%). Очень плотные глины, суглинки, супеси. Плотный каолин. Сухие пески. Плывуны, дающие при бурении «пробку» более 2 м. Мягкие глинистые, углистые и талько-хлоритовые сланцы. Мергель. Глинистый песчаник. Известняк-ракушечник, гипс. Твердый мел. Ангидрит. Опока. Каменная соль. Слабые аргиллиты. Мягкий (бурый) каменный уголь. Бокситы, фосфориты. Мерзлые: глины, суглинки, супеси, песок, ил, торф. Лед. Строительный мусор с битым кирпичом, без железного лома	0,96	0,35
V	Мелкий галечник и щебень с валунами. Дресва и гравий. Песчано-глинистые породы с большим содержанием гальки, щебня (>35%). Плотные мергели. Песчано-глинистые сланцы. Слабо сцементированные песчаники и известняки. Аргиллиты. Крепкий каменный уголь. Слабые конгломераты осадочных пород на известковом цементе. Ноздреватые бурые железняки. Выветрелые изверженные породы: граниты, сиениты, диориты, габбро. Мерзлые гравийно-галечные породы с песчано-глинистым заполнителем. Плотно слежавшийся строительный мусор с битым кирпичом и железным ломом	0,40	0,30
VI	Крупные галечник и щебень с валунами Разновидность окварцованных крепких сланцев, известняков и песчаников. Мрамор. Доломиты. Конгломераты на кремнистом цементе. Крупнозернистые изверженные породы: граниты, сиениты, диориты, габбро, гнейсы, порфиры	0,20	01,25
VII	Галечник и щебень с большим количеством крупных валунов кристаллических пород. Кремнистые сланцы, известняки, песчаники. Мелкозернистые, изверженные породы: граниты, сиениты, диориты, габбро. Конгломераты кристаллических пород на кремнистом цементе	0,08	0,20

Инструмент

К рабочему инструменту относятся: долота, забивные стаканы, желонки, ударные штанги с переходниками, раздвижные штанги и канатные замки. Различные комбинации этого инструмента составляют буровой снаряд для разрушения и извлечения породы из скважины.

Долота

Долота предназначаются для непосредственного разрушения породы на забое скважины. По форме, которая соответствует их технологическому назначению, различают долота плоские, двутавровые, крестовые, округляющие и пирамидальные. Долото состоит из лопасти, шейки и резьбового конуса. Продольные, углубленные в тело долота пазы способствуют продвижению воды и шлама при перемещении долота вниз и вверх. В зависимости от крепости буримых пород рабочая часть долота (лезвие) имеет различный угол приострения. Долота для мягких пород имеют угол 70–80°, для пород средней твердости — 90–115°, для твердых пород и валунно-галечниковых отложений лезвие долота заправляется под углом 110–130°. Долото плоское (рис. 5.1, *а*) предназначено для бурения мягких пород, двутавровое (рис. 5.1, *в*) — для вязких пород. Благодаря поперечным бортам на лезвии это долото хорошо обрабатывает стенки скважины. Долото крестовое (рис. 5.1, *г*) применяют в твердых трещиноватых породах и валунно-галечниковых отложениях. Оно имеет в сечении крестообразную форму. Долото округляющее (рис. 5.1, *б*) используют в твердых породах. В процессе бурения оно хорошо калибрует скважину и выравнивает стенки. Округляющие долота дают также хорошие результаты при бурении трещиноватых пород и валунно-галечниковых отложений. Лезвие при этом должно иметь угол приострения не менее 110°.

Во время бурения происходит постепенное затупление лезвия долота и снашивание (истирание) боковых периферийных поверхностей. Затупление допускается до определенных пределов, после чего долото вновь следует заправить.

При этом износ боковых поверхностей не должен превышать 2–3 мм. Изношенные лезвия восстанавливают на базах экспедиций или партий кузнечным способом. Эта операция трудоемкая, поскольку выполняется вручную. Кроме того, многократные нагревы приводят к изменению структуры металла долота, что снижает его износостойкость и прочность.

Широкое применение нашли долота со съемными лезвиями (рис. 5.1, *д*), которые используются при ударно-канатном бурении. Износостойкость съемных лезвий гораздо больше, чем лезвий цельных долот. Как показал опыт бурения скважин, применение долот со съемными лезвиями имеет следующие преимущества:

- облегчается труд буровиков и повышается безопасность работ;
- увеличивается производительность труда и снижается стоимость метра бурения скважины;
- повышается качество работ за счет выдержанного диаметра скважины;

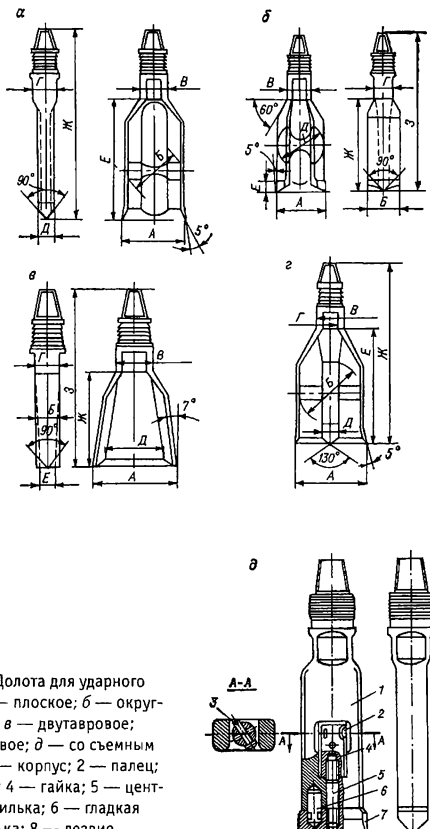


Рис. 5.1. Долота для ударного бурения: *а* — плоское; *б* — округляющее; *в* — двутавровое; *г* — крестовое; *д* — со съемным лезвием: 1 — корпус; 2 — палец; 3 — шплинт; 4 — гайка; 5 — центровая шпилька; 6 — гладкая шпилька; 8 — лезвие

– обеспечивается возможность подбора рациональной геометрии лезвий для конкретных пород.

Желонки

Желонки (рис. 5.2) применяют для бурения скважин в сыпучих, плывучих и вязких породах, а также для чистки скважины после бурения долотом. Желонка состоит из трубчатого корпуса, вилки с конической резьбой или ушком, стального башмака, одностворчатого или двустворчатого клапана, откидывающегося вверх. Применяются также желонки с полусферическим клапаном и копьем, а также поршневые. Желонка одностворчатая с плоским клапаном (рис. 5.2, *а*) служит для бурения скважин в плывучих породах, также для чистки забоя от разбуренной породы. Желонка с двустворчатым клапаном (рис. 5.2,) применяется для удаления с забоя разбуренной породы и для углубления скважины в песках средней зернистости. Эти желонки изготавливаются для бурения скважин больших диаметров (>–335 мм).

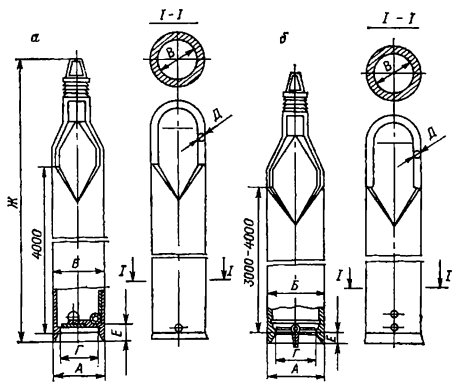


Рис. 5.2. Желонки: *а* — одностворчатая; *б* — двустворчатая

Забивные стаканы

Для бурения сухих песков, гравия, суглинков, мореных глин применяют забивные стаканы (рис. 5.3). Забивной стакан представляет собой отрезок трубы длиной 60–70 см, нижняя часть которой имеет заточку или снабжена башмаком с острой режущей кромкой. Внутри трубы на высоте 20–30 мм от конца привариваются пластинки толщиной 4–5 мм, предотвращающие выпадение керна при подъеме стакана.

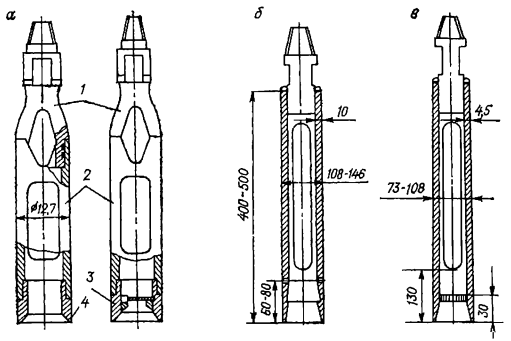


Рис. 5.3. Забивные стаканы: *а* — к установке УПБ-15М; *б* — для бурения полускальных пород; *в* — для бурения глинистых пород; 1 — вилка; 2 — корпус; 3 — башмак с клапаном; 4 — башмак без клапана

В отдельных случаях используют забивные стаканы с паукообразным пластинчатым кернодержателем. К верхней части трубы приваривается переходник с резьбой, ниже переходника в трубе прорезается отверстие диаметром 12–15 мм для выхода жидкости. В забивных стаканах диаметром 273 мм и больше (рис. 5.4) переходник вместе с центрирующими пластинами толщиной 12–15 мм помещается внутрь и приваривается к трубе. Собирают забивной стакан обычно с раздвижной и короткой ударной штангами, при этом ход раздвижной штанги должен быть больше, чем ход ударного механизма. При смятии нижнего конца трубы последний обрезается, и стакан может использоваться повторно.

Канатные замки

Канатные замки (рис. 5.5) предназначены для соединения бурового снаряда со стальным канатом. Замок состоит из корпуса с конусной резьбой в нижнем конце для соединения с буровым нарядом; втулки, в которой заделывается канат; и опорной шайбы. На верхнем конце корпуса имеются кольцевые канавки, предназначенные для захвата замка при ловильных операциях. В нижней части замка снаружи сделаны выемки для инструментальных ключей. В случае, если в замке есть гнездо, в котором втулка с заделанным в нее канатом может свободно вращаться вокруг оси и перемещаться вертикально, канатный замок называется самовращающимся.

Трубные переходники

Переходники (рис. 5.6) используются для соединения инструментов бурового снаряда, имеющих разные конусные резьбы. В нижней части переходник имеет внутреннюю конусную резьбу, выше на его теле предусмотрены плоскости для захвата ключом, а на верхнем конце — наружная конусная резьба.

Раздвижные штанги

Рабочие раздвижные штанги (рис. 5.7) предназначены для выбивания снаряда из забоя во время бурения, особенно вязких или кавернозных пород. Раздвиж-



Рис. 5.4. Забивной стакан большого диаметра (273 мм и более)

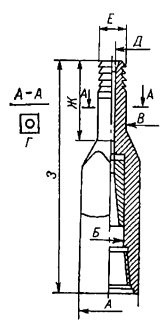


Рис. 5.5. Канатный замок

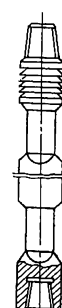


Рис. 5.6. Переходник резьбовой

ная штанга состоит из двух звеньев, скользящих одно в другом. Нижнее звено имеет внутреннюю коническую резьбу для соединения с ударной штангой, а верхнее — наружную коническую резьбу для соединения с канатным замком. Рабочая раздвижная штанга имеет ход 150–250 мм, ловильная — 550 мм.

Штанги ударные

Штанги ударные (рис. 5.8) предназначены в основном для увеличения веса снаряда в целях повышения эффективности разрушения породы. Ударная штанга представляет собой круглый стержень с резьбами и выемками под инструментальные ключи. Ударные штанги изготавливаются двух типов: гладкоствольные (рис. 5.8, *а*) и с высаженными концами (рис. 5.8, *б*). Отношение диаметра ударной штанги к диаметру скважины обычно принимают равным 0,65–0,80, при этом меньшее значение берется для скважин большого диаметра.

Ключи инструментальные (рис. 5.9) предназначены для ввинчивания инструмента в буровой снаряд.

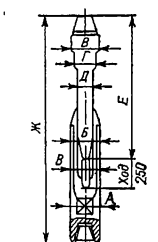


Рис. 5.7. Рабочие раздвижные штанги

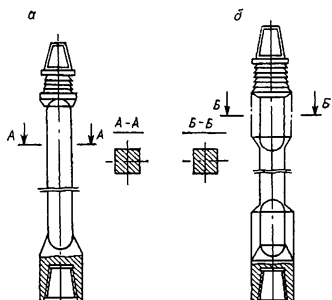


Рис. 5.8. Штанги ударные:
а — гладкоствольные;
б — с высаженными концами



Рис. 5.9. Ключ инструментальный

Обсадные трубы и принадлежности к ним

Обсадные трубы в ударно-канатном бурении служат для закрепления стенок и углубки скважины. Поэтому при разведке гравийно-песчаных месторождений применяют только стальные цельнотянутые трубы в соответствии с ГОСТ. Каждая труба имеет нарезку и муфту. Обсадные трубы с наружным диаметром 114–245 мм имеют резьбу 8 ниток на 25,4 мм, трубы диаметром 273–426 мм — 6 ниток на 25,4 мм.

Трубы стальные электросварные поставляются диаметром от 426 до 1420 мм длиной не менее 5 м с одним продольным швом. Использование труб длиной 5–14 м вызывает трудности при спуске их в скважину. Поэтому в зависимости от конкретных условий в геологических организациях при бурении неглубоких скважин широко применяются трубы длиной 1–2,5 м с цилиндрической резьбой и соединением «труба в трубу». Использование коротких труб приводит к увеличению резьбовых соединений и, как следствие, к ослаблению прочности колонны, но при этом значительно облегчается труд буровых рабочих. Для предохранения нижней трубы колонны от смятия первая опускаемая труба имеет башмак.

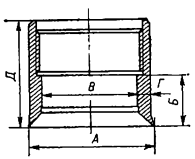


Рис. 5.10. Башмак для обсадных труб

Башмаки (рис. 5.10) имеют вид толстостенного кольца, внутренний диаметр которого равен внутреннему диаметру обсадной трубы, а наружный диаметр на 2,5 мм больше наружного диаметра муфты той же трубы. Нижний край башмака заканчивается режущей кромкой, лезвие которой закаливается. Размеры обсадных труб, муфт и башмаков приведены в соответствующих ГОСТ.

Головки забивные многоступенчатые

Головки забивные (рис. 5.11) предохраняют обсадные трубы от разрушения при ударах по торцу во время посадки их в скважину. Для сокращения количества головок на скважине их конструкция выполнена многоступенчатой, дающей возможность одной головкой обслуживать трубы нескольких диаметров. Забивной снаряд (рис. 5.12) служит для забивания обсадных труб при посадке их в скважину.

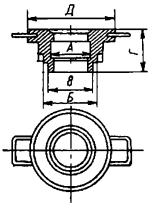


Рис. 5.11. Головка забивная

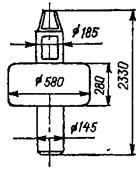


Рис. 5.12. Забивной снаряд

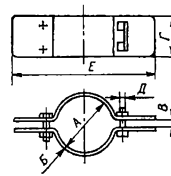


Рис. 5.13. Хомут для обсадных труб

Хомуты

Хомуты для обсадных труб (рис. 5.13) предназначены для подвешивания труб во время их спуска в скважину. Каждый хомут состоит из двух скоб, соединяющихся болтами. Между скобами зажимается труба. Хомуты легкого типа используются для вспомогательных операций: подтаскивания труб к скважине, подъема и подвешивания очередной трубы при спуске колонны в скважину и т. д. Хомуты более тяжелой конструкции применяются для подвешивания тяжелых колонн.

ТЕХНОЛОГИЯ

Конструкция скважин определяется крупностью обломочного материала и минимальным весом послойных (секционных) проб. При разведке месторождений песков наиболее распространенными являются скважины диаметром 89–127 мм, а при разведке гравийно-песчаных пород — 152–203 мм (6–8"). При наличии крупного гравия или большого количества валунов такие месторождения должны разведываться скважинами большого диаметра или шурфами (дудками). В этом случае начальный диаметр может достигать 500–600 мм.

Число колонн обсадных труб, которыми закрепляется скважина, должно быть минимальным. Общее число колонн труб зависит от принятого выхода колонны обсадных труб из-под башмака предыдущей (6–10 м, реже 12–15 м), глубины скважины и минимально допустимого конечного диаметра бурения. Этими параметрами определяется и начальный диаметр скважины.

Основные параметры технологии ударно-канатного бурения определяются требованиями опробования и степенью сложности геологического разреза и заключаются в следующем.

1. Проходка за рейс и длительность операции долбления определяются не критерием максимальной рейсовой скорости, а оптимальным интервалом рейсового опробования, необходимым для получения представительной пробы по гранулометрическому и петрографическому составу, а также принятыми интервалами секционного, послойного и погоризонтного опробования. Это ограничение может существенно влиять на скорость бурения скважины.
2. Процесс бурения сопровождается обязательным креплением стенок скважины ходовой или опережающей колонной обсадных труб. Операция по креплению скважины трубами занимает время, сопоставимое со временем, затрачиваемым на собственно бурение.
3. Длительность операции чистки при бурении в трубах выбирается не из условий высокой скорости бурения. Главным при этой операции является возможно полное извлечение породы. Влияние на скорость бурения таких параметров, как тип долота, масса снаряда, высота сбрасывания инструмента и другие имеет обычный характер. Но при этом необходимо иметь в виду, что по удельной работе можно судить о крепости пород или их категории лишь как об обобщающих, усредненных характеристиках. Гравийно-песчаная толща даже в одной плоскости забоя представлена легкоразрушающимися материалами в виде песка, глины, ила и труднобуримыми валунами и крупным гравием. Поэтому зависимости, отражающие закономерности изменения скоростей бурения от параметров процесса, установленных для случаев бурения относительно выдержанных по буримости пород, являются правомерными в данном случае лишь в их вероятностно-статистической интерпретации.

Точность определения гранулометрического и петрографического состава, а также содержание вредных примесей зависят от выхода керна и обогащения или разубоживания проб по каждому интервалу бурения или опробования. Этими же ограничениями определяется и точность фиксации границ продуктивной толщи и границ отдельных слоев в пределах продуктивной толщи. Указанные исходные предпосылки определяют специфические технологические схемы бурения, сущность которых заключается в следующем.

1. В рыхлых, сыпучих, обводненных отложениях колонна обсадных труб опережает забой на высоту предохранительного столбика, равную 5–10 см. В случае вскрытия напорных водоносных горизонтов или при встрече плывунов, когда в трубах образуются пробки, высота предохранительного столбика увеличивается до 20–50 см. Этот способ называется бурением в трубах.

2. В плотных отложениях с включением большого количества валунов и крупного гравия допускается отставание башмака обсадных труб от забоя на интервал опробования. Но и в этом случае, если бурение не совмещено по времени с отбором проб, а опережает его, то перед опробованием крепится трубами соответствующий интервал с учетом врезания башмака в целик на высоту предохранительного столбика, затем, если необходимо, производится дополнительное разрыхление породы в трубах и отбор пробы. Эта схема получила название бурения ниже башмака обсадных труб.
3. В породах промежуточных по плотности и устойчивости башмак обсадных труб и забой скважины могут находиться на одном уровне. Эта схема называется бурением на одном уровне.

С учетом отличительных особенностей бурения скважин при разведке гравийно-песчаных месторождений, практики работ и рекомендаций, имеющихся в опубликованной литературе, основные параметры процесса представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Параметры бурения скважин

Показатели	Рыхлые сыпучие породы (песок, гравий)	Плотные породы с включениями большого количества валунов	Устойчивые крепкие породы
Технологическая схема	в трубах	ниже труб	без труб
Интервал бурения за рейс, м	0,2–0,5	0,2–01,5	0,4–1,0
Масса бурового снаряда, приходящаяся на 1 см длины долота, кг	20–35	30–50	50–60
Высота сбрасывания инструмента, м	0,40–0,70	0,40–1,0	0,70–1,20
Интервал забивки обсадных труб, м	0,2–0,5	0,2–0,5	–
Угол заострения лезвия долота, градусы	60–80	90–100	110–120

В обводненных песках, не содержащих валунов или большого количества крупного гравия, бурение может осуществляться желонкой и, таким образом, процессы опробования и бурения оказываются совмещенными во времени. При желонировании число ударов в минуту желонкой должно быть равно 20–30, высота ее сбрасывания — 0,2 м и более. Желонки рекомендуется применять в комплекте с ударными штангами с таким расчетом, чтобы масса снаряда была равна 0,5–1,0 т. При бурении по схеме ниже труб желонка не должна выходить за башмаки обсадных труб более чем на 0,5–1,0 м.

Бурение крупнообломочных, а также плотных глинистых и песчаных пород осуществляется сплошным забоем с обычным ударно-канатным инструментом (долота, желонки, стаканы и т. д.). Частота ударов бурового снаряда (долота) должна регулироваться в соответствии с высотой подъема его над забоем скважины. Правильное их соотношение определяется по силе рывков или по вращению оттяжного ролика. Когда частота ударов понижена, движение бурового снаряда следует за движением балансира; канат плотно прилегает к оттяжному ролику, а последний в течение одного или нескольких ударов остается неподвижным по отношению к своей оси. При нормальной частоте ударов движение оттяжного ролика в первую половину пути опережает движение снаряда; канат отстает от оттяжного ролика, который поворачивается вокруг своей оси (на 20–30 мм по ободу) при каждом ударе. При повышенной частоте ударов снаряд еще не успевает внедриться в породу, когда оттяжной ролик начинает натягивать канат и поднимать его над забоем. Такая работа станка сопровождается сжатием амортизатора и сильными рывками. Скорость бурения при этом снижается.

Бурение в различных геологических условиях

Бурение рыхлых пород. Бурение осуществляется с креплением стенок скважины обсадными трубами. Процесс собственно бурения в данном случае проходит без особых затруднений. В качестве породоразрушающего наконечника применяется желонка, иногда в комплекте с легкой ударной и раздвижной штангами. При бурении вмещающих пород, не представляющих интереса с точки зрения их опробования и геологического изучения, можно добавлять глину с утрамбовкой ее на забое для того, чтобы последняя, смешавшись на забое с разбуриваемой породой, обеспечивала условия для лучшей чистки скважины. Число ударов снаряда в минуту — не больше 50 при подъеме над забоем на высоту не более 1 м.

Бурение глин и суглинков. Данные породы отличаются разнообразием физико-механических свойств (плотность, крепость, вязкость и т. п.). В зависимости от этого подбирается соответствующий метод бурения. Плотные разновидности этих пород пробуриваются зубильным долотом с подливом воды, если в скважину нет естественного водопритока. После разрыхления глины долотом скважина очищается от шлама при помощи желонки. Для повышения механической скорости разрушения плотных вязких глин в скважину засыпается щебень из расчета двух ведер на цикл долбления. Бурение менее плотных глин и суглинков можно осуществлять непосредственно желонкой с предварительно снятым клапаном. Такая желонка используется в комплекте

с ударной и раздвижной штангами. В целях облегчения извлечения керна из желонки применяют ее разъемную разновидность с навинчивающимся башмаком. Число ударов в минуту при бурении глин и суглинков составляет 40–50 при высоте подъема снаряда над забоем до 1 м.

Бурение песков или гравийно-песчаной породы с небольшим содержанием мелкого гравия. Для бурения обычно используется желонка с плоским клапаном. Специфичность условий предопределяет следующие ограничения:

- при бурении по схеме ниже труб приблизительно 1/3 желонки во избежание заклинивания должна оставаться в трубах;
- зазор между наружным диаметром желонки и внутренним диаметром труб должен быть не менее 100 мм;
- если пробуриваемые пески не относятся к продуктивной толще, то для достижения более высокой скорости бурения рекомендуется забрасывать на забой скважины жирную глину, которая связывает между собой частицы песка;
- спуск колонны обсадных труб осуществляется одновременно с бурением;
- в ряде случаев оказывается целесообразным применение метода подсоса, когда после заполнения желонки породой приблизительно на 1/3 ее длины последняя приподнимается при помощи штурвала с непрекращающейся при этом посадкой труб. Подъем желонки с одновременной посадкой труб вызывает за счет создающегося вакуума движение вверх, что способствует погружению колонны обсадных труб под действием собственного веса;
- в случаях, если песок принадлежит к продуктивной толще и подлежит опробованию, лучше всего использовать способ бурения в трубах. Если при этом происходит утрамбовка песка до такой степени, что желонирование идет неудовлетворительно, породу в трубах необходимо разрыхлить при помощи зубильного долота.

Число ударов желонки в минуту — 35, высота подъема над забоем — до 1 м.

Бурение гравийно-песчаной породы с большим содержанием крупного гравия. В данном случае применяется желонка с обычным плоским клапаном при высоте кольца башмака, равной 20– 25 мм. Необходимо, чтобы при бурении желонка не переполнялась, так как отдельные куски гравия могут через верхний край желонки выбрасываться и заклинивать ее внутри труб. Так же как и в предыдущем случае, зазор между наружным диаметром желонки и внутренним диаметром труб должен быть не менее 100 мм. Если

пробуриваемая порода относится к продуктивной толще и если это окажется возможным, то лучше осуществлять бурение в трубах. Предварительное разрыхление породы перед желонированием, если этого требуют конкретные условия, производится долотом зубильного типа. Желонирование должно выполняться несильными, но частыми ударами (40–45 ударов в минуту), высота подъема желонки над забоем 0,8–1,0 м.

Бурение гравийно-песчаной породы с большим количеством валунов. Наибольшие затруднения при бурении скважин в гравийно-песчаных породах возникают при встрече валунных отложений, особенно когда валуны перемыты, отсортированы. Осложняет бурение крепость и подвижность валунов.

Если валуны одиночны и небольших размеров, их успешно разбивают пирамидальным долотом, которое в комплекте с ударной штангой сбрасывается в скважину. С помощью ударных штанг можно обеспечить необходимую массу снаряда и тем самым силу удара. При падении такой снаряд развивает большую скорость и ударяется о валун, раскалывая его. Причем бурение обычно ведется с ходовой колонной труб, т. е. колонна все время идет за буровым наконечником.

Для разрушения крупных валунов применяют тяжелые округляющие крестовые долота. Извлечение разбитых кусков валунов производится простыми утяжеленными и грейферными желонками, диаметр которых не должен превышать 0,7 внутреннего диаметра обсадных труб, для того чтобы обеспечить свободное падение желонки, а следовательно, и более эффективный забор разрушенной породы.

Число ударов в минуту при работе тяжелыми долотами должно быть не более 40, а высота подъема над забоем не менее 1 м.

В некоторых случаях удается сдвинуть валун в сторону от ствола скважины. Эта работа выполняется при помощи пирамидального долота, которое, углубляясь, стремится оттолкнуть валун в сторону. Иногда для ускорения бурения валунных зон применяют взрывные заряды. При этом на время взрыва обсадные трубы приподнимают на высоту, которая достаточна для того, чтобы они не пострадали от взрыва.

Опыт разведки крупных гравийно-песчаных месторождений Ленинградской области с большим содержанием валунов любых размеров показал, что для бурения скважин глубиной 50–60 м наиболее эффективен буровой станок УКС-22М (УГБ-3УК). Рекомендуется использовать при этом большие диаметры скважин, так как выход колонн составляет 7–10 м. Поэтому начальный диаметр таких скважин иногда достигает 400 мм (16"), а конечный — 168 мм (6").

Производительность буровых работ колеблется в широких пределах (80–120 м на станко-месяц при работе в одну смену) и зависит от количества и размеров, встречающихся в разрезе валунов.

Сравнительно высокая стоимость 1 м бурения скважин большого диаметра оправдана возможностью проходки полезной толщи на полную мощность.

Бурение забивными стаканами. Данный способ бурения находит все более широкое применение при разведке месторождений строительных материалов, а также при инженерно-строительных изысканиях. Этому способствует технико-экономическая эффективность процесса, достаточно высокая представительность опробования, простота технологии и организации работ.

Существуют две технологические схемы бурения забивными стаканами: ниже башмака обсадных труб и в трубах. При бурении ниже башмака обсадных труб керноприемный стакан забивается в породу, а после подъема снаряда колонной обсадных труб производится разбуривание пройденного керноприемником интервала. Порода, обрушаемая со стенок скважины при разбуривании, оказывается при этом внутри колонны обсадных труб и извлекается на поверхность вместе с очередным рейсом керноприемника. В связи с этим длина рейса уменьшается, так как часть керноприемника заполняется породой предыдущего интервала.

При бурении в трубах рейсу керноприемника предшествует забивание колонны обсадных труб в породу на длину последующего рейса. Забивку колонны обсадных труб следует выполнять с одновременным вращением. Порода, оказавшаяся внутри труб, извлекается при помощи керноприемника.

Бурение забивными стаканами в интервалах, представленных относительно устойчивыми породами, осуществляется без крепления стенок скважины. Для этих случаев рекомендуется применять буровой снаряд, состоящий из забивного стакана, аварийной раздвижной штанги с ходом 450–550 мм и ударной штанги. При этом ход ударного механизма бурового станка обязательно должен быть меньше хода раздвижной штанги, так как только при этом условии происходит эффективное углубление стакана в породу. Как показала практика бурения забивными стаканами при разведке гравийно-песчаных месторождений в Ленинградской области, такая технология обеспечивает 100%-ный выход керна и возможность бурения ряда скважин без крепления их трубами. В случае необходимости спуск колонны обсадных труб можно осуществить, прервав на это время процесс бурения.

Если встречаются крупные валуны, то они разбиваются либо при помощи башмака керноприемника, либо при помощи специального снаряда, состоящего

из плоского долота и ударных штанг. Ориентировочная масса такого снаряда в зависимости от диаметра скважины составляет 250–1300 кг.

Способ бурения забивными стаканами может быть эффективно использован в тех случаях, когда требуется обеспечить наиболее полный выход керна по какому-либо определенному интервалу или в целом по скважине, надежно предохранить его от разубоживания или обогащения в процессе отбора или транспортировки, т. е. обеспечить наиболее полную представительность кернового опробования. Для этого он может быть использован как технологический прием в процессе ударно-канатного, шнекового и других способов бурения, когда скважина бурится одним из высокопроизводительных способов, а отдельные интервалы — забивным стаканом. Потери в производительности, которые будут иметь место только по одному или нескольким интервалам, а не по скважине в целом, будут влиять не так ощутимо на ухудшение технико-экономических показателей, отнесенных к единице длины скважины или к единице времени. Естественно, что при проектировании включение данного способа в технологическую схему бурения скважины должно учитывать весь комплекс условий, путей и способов достижения намеченных целей. Из нескольких возможных вариантов необходимо выбрать оптимальный, отдавая предпочтение тем вариантам, которые обеспечат наиболее высокие качественные показатели.

В таблице 5.5 приведены технические характеристики некоторых буровых станков и установок, которые могут быть использованы при геологоразведочных работах на месторождениях строительных материалов.

Таблица 5.5

Технические характеристики установок для бурения скважин глубиной до 100 м ударно-канатным способом

Параметры	УБП-15М	БУКС-ЛГТ	БУЛИЗ-15АП	АВБ2М
1	2	3	4	5
Глубина бурения, м				
Начальный диаметр скважины, мм				
Способы бурения	Ударно-канатный		Колонковый, с призабойной циркуляцией, шнековый, медленновращательный, ударно-канатный, вибрационный	Вибрационный, ударно-канатный

Продолжение табл. 5.5

Параметры	УБП-15М	БУКС-ЛГТ	БУЛИЗ-15АП	АВБ2М
1	2	3	4	5
База	Одноосный прицеп		ГАЗ-69	ГАЗ-66
Тип вращателя (основной рабочий орган)			Ротор, вибромолот	Вибромолот ВБ-7
Частота вращения ротора, об./мин			32–165	
Диаметр проходного отверстия ротора, мм				
Ход каретки вращателя, мм				
Усилие подачи вниз, Н				
Грузоподъемность лебедки, т	1	0,7	2,5	4
Скорость навивки каната на барабан, м/с	0,9	0,5	0,1–0,5	0,5
Тип ударного механизма				
Число ударов снаряда в минуту			До 25	До 25
Масса ударного снаряда, кг				
Ход ударного снаряда, с лебедки, мм			С лебедки	С лебедки
Высота мачты, м	5,6	5,0	5,2	7,5
Грузоподъемность мачты, т			5	12
Тип механизма для погружения обсадных труб				
Максимальный крутящий момент механизма погружения обсадных труб, Н×м				
Габаритные размеры в транспортном положении, м длина ширина высота	 4,0 1,8 2,2	 5,1 1,4 1,4	 4,2 1,75 2,3	 7,5 2,35 3,4
Масса, кг	1000	440	2030	6300
Тип двигателя	4Д-2	Д-300	От двигателя автомобиля	
Мощность двигателя, кВт	4,3	3,2		

Параметры	АВБ3	УБР-1	УБР-2
1	6	7	8
Глубина бурения, м	20, 49, 100	15	26
Начальный диаметр скважины, мм	168, 325	121	253
Способы бурения	Ударно-канатный, вибрационный, вибровращательный, колонковый, с призабойной циркуляцией и с промывкой	Ударно-канатный, медленно-вращательный	Ударно-канатный, медленновращательный
База	ЗИЛ-131	Сани	ЗИЛ-131
Тип вращателя (основной рабочий орган)	Вибромолот ВБ-7М	Ротор, ударное устройство	Ротор, ударное устройство
Частота вращения ротора, об/мин.	50, 98, 124, 245, 390	7, 12	12, 24, 76
Диаметр проходного отверстия ротора, мм		136	255
Ход каретки вращателя, мм			
Усилие подачи вниз, Н			
Грузоподъемность лебедки, т	4	1	1,8
Скорость навивки каната на барабан, м/с	0,41; 0,82	0,5; 0,8	0,51
Тип ударного механизма			
Число ударов снаряда в минуту	До 25	27, 46	37
Масса ударного снаряда, кг		200	300
Ход ударного снаряда, мм	С лебедки	550	600
Высота мачты, м	7,6	7	8

Продолжение табл. 5

ЛБУ-50	УГБ-50М	БУГ-50	БУГ-100	БУУ-3
9	10	11	12	13
50	50-100	50	100-200	50
200	230	273	273	273
Вращательный, ударно-канатный	Шнековый, колонковый, ударно-канатный	Ударно-канатный	Ударно-канатный	Ударно-канатный, вращательный
ЗИЛ-157К	ГАЗ-66	ЗИЛ-167КЕ	Сани	Гусеничный вездеход
Подвижной ротор	Подвижной ротор			Откидной ротор
14, 38, 63, 100	70, 125, 200			43, 83, 125
3250	1500			1000
553	510			194
2,5	2,5	3	4	2,3
0,47; 1,28; 2,13; 3,93	0,64; 1,24; 1,98	0,42; 0,87; 1,60	1,0; 1,3	
Кривошипно-шатунный со свободным сбросом снаряда	Кривошипно-шатунный	Кулачковый со свободным сбросом снаряда	Кулачковый со свободным сбросом снаряда	Кривошипно-шатунный
17, 48, 78, 126	45, 80	20, 43	30, 60	40, 60
500	400	500	1000	1000
1000	650	600	250, 500	400, 600
8,3	8	9,8		12

Параметры	АВБЗ	УБР-1	УБР-2
1	6	7	8
Грузоподъемность мачты, т	12	3	6
Тип механизма для погружения обсадных труб			
Максимальный крутящий момент механизма погружения обсадных труб, Нхм			
Габаритные размеры в транспортном положении, м: длина ширина высота	 7,6 2,35 3.5	 1,9 0,98 1,35	 2,67 0,962 8,285
Масса, кг Тип двигателя Мощность двигателя, кВт	9900 Д3763-1 21	1025 Д-300 3,2	2000 24-8,5/11 7,4

Окончание табл. 5

ЛБУ-50	УГБ-50М	БУГ-50	БУГ-100	БУУ-3
9	10	11	12	13
5	7,3	9		13,4
		Кривошипно-шатунный механизм расхаживания труб		
		140	200	
6,38 2,315 2,546	8 2 3	9,7 2,1 4,5	3,455 2,2 2,2	8,3 2,9 3,65
8440	5110	4500	2900	11500

5.3.2. Колонковое бурение

Колонковое бурение скважин применяется при поисках и разведке месторождений песка, гравия, глинистых, карбонатных и магматических пород. Значительная часть геологоразведочных скважин при разведке указанных месторождений имеет глубину 10–50 м, реже 100 м. За счет внедрения новых способов бурения (вибрационного, вибровращательного и др.) в последние годы объемы колонкового бурения скважин при разведке месторождений песков, гравия и глинистых пород значительно уменьшились. В то же время бурение скважин при разведке месторождений карбонатных и магматических пород осуществляется только колонковым способом.

С внедрением новых буровых установок, имеющих высокую частоту вращения шпинделя, появилась возможность применять форсированные режимы бурения. Это привело к значительному повышению скорости бурения скважин при разведке строительных материалов.

Вместе с тем жесткие требования, предъявляемые к отбору керновых проб из скважин при разведке карбонатных пород (известняк, доломит, мрамор и др.), часто вынуждают переходить на безнасосное бурение. В этом случае производительность бурения несколько ниже, однако качество опробования полезного ископаемого повышается.

Буровые станки и установки

Для бурения скважин колонковым способом при разведке строительных материалов наиболее часто применяют стационарные буровые станки и самоходные установки.

Методические требования бурения скважин больших диаметров с малой подачей промывочной жидкости или с призабойной циркуляцией, а также ограничения по длине рейса вызывают необходимость использования буровых станков большой мощности. Значительный удельный вес спускоподъемных операций в процессе бурения мелких скважин, сложность геологического разреза делают также целесообразным использование высоких мачт и вполне оправдывают грузоподъемность лебедок, которыми оснащены эти установки.

Бурильные, колонковые и обсадные трубы

При бурении скважин различными буровыми установками используются стальные и легкосплавные трубы. Колонны стальных бурильных труб применяются при бурении скважин большого диаметра (76 мм и выше). Для бурения скважин малого диаметра используются легкосплавные бурильные трубы

(ЛБТ), которые соединяются между собой стальными ниппелями, а свечи — специальными стальными замками, имеющими с одной стороны ленточную резьбу (соединение с трубой), а с другой — конусную.

Масса 1 м ЛБТ составляет около 60% массы стальной бурильной трубы. В результате этого применение ЛБТ позволяет значительно повысить предельную глубину бурения и облегчить труд бурильщиков.

В практике бурения скважин на строительные материалы, как правило, применяются простые колонковые снаряды — одинарные и двойные (последние используют, когда одинарные снаряды не позволяют получить качественный керн). Обсадные трубы колонкового бурения изготовляют с ниппельным и безниппельным соединением длиной 1,0–4,5 м.

Колонковое бурение с призабойной циркуляцией промывочной жидкости

Несмотря на ряд недостатков, присущих данному способу бурения (низкая производительность, сравнительно высокая трудоемкость, повышенный расход истирающих материалов, сложность оптимизации технологического процесса и др.), колонковое бурение с призабойной циркуляцией довольно широко применяется в практике геологоразведочных работ на месторождениях строительных материалов. Это объясняется тем, что данный способ обеспечивает довольно высокую точность геологической информации и может применяться в тех условиях, где высокопроизводительные способы бурения не могут быть использованы, а вследствие небольших глубин скважин (до 50 м) организация сложного хозяйства для приготовления глинистого раствора оказывается нерентабельной.

Колонковый снаряд для бурения с призабойной циркуляцией состоит из коронки 1, армированной твердосплавными резцами, стандартной колонковой трубы 2, переходника 3 с колонковой трубы на шламопроводящий патрубок, шламопроводящего патрубка 6 с отверстиями 7 для прохода жидкости и шарового клапана 5 (рис. 5.14). Для бурения с призабойной циркуляцией могут применяться стандартные твердосплавные коронки, однако наилучшие показатели достигаются при использовании коронок с увеличенным выходом резцов за боковые поверхности: за наружную — 3 мм, за внутреннюю — 2 мм.

Шламопроводящий патрубок 7 представляет собой отрезок бурильной трубы с двумя просверленными отверстиями диаметром 10–12 мм. Выше отверстий устанавливается ограничительная шпилька 8, препятствующая чрезмерному движению вверх шарового клапана.

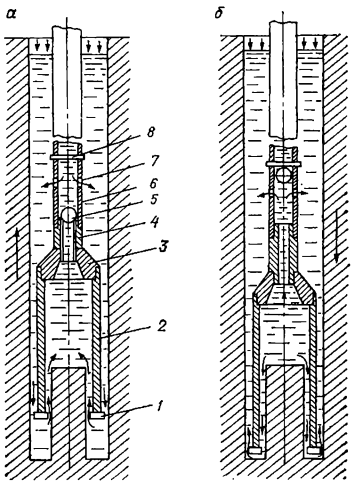


Рис. 5.14. Схема циркуляции снаряда при бурении с призабойной циркуляцией: *а* — движение снаряда вверх; *б* — движение снаряда вниз

Шаровой клапан представляет собой стальной шарик, подобранный по внутреннему диаметру шламопроводящего патрубка, для которого в ниппеле 4 (или в замке), соединяющем патрубок с переходником 3, выточено гнездо с таким расчетом, чтобы при движении снаряда вверх шарик надежно перекрывал внутреннее пространство колонковой трубы от столба жидкости, находящегося в бурильных трубах.

Процесс бурения с призабойной циркуляцией осуществляется при одновременном вращении и расхаживании снаряда в скважине (рис. 5.14). При подъеме снаряда над забоем происходит перемещение жидкости из наружного кольцевого зазора в колонковую трубу. Шаровой клапан перекрывает отверстие в ниппеле, препятствуя перемещению жидкости из бурильных труб в колонковую трубу. Жидкость, двигаясь из кольцевого зазора, увлекает шлам с забоя скважины во внутреннее пространство колонковой трубы, одновременно охлаждая коронку.

При движении снаряда вниз клапан поднимается до ограничительной шпильки, обеспечивая жидкости возможность перемещаться из внутреннего пространства колонковой трубы через отверстия в шламопроводящем патрубке в кольцевой зазор между стенками скважины и колонковой трубой. При этом тяжелые, крупные частицы шлама оседают на керне, более легкие частицы циркулируют вместе с жидкостью. Включение в состав снаряда шламовой

трубы положительно сказывается на процессе бурения, предотвращая чрезмерное зашламование скважины.

Собственно разрушение породы на забое происходит в промежуток времени между сбрасыванием снаряда и его очередным подъемом и исчисляется в пределах одного цикла секундами. Поскольку затраты времени на расхаживание снаряда и на собственно бурение сопоставимы, время чистого бурения при данном способе примерно в 2 раза меньше, чем при колонковом бурении с промывкой при прочих равных условиях. Это является основной причиной, обуславливающей сравнительно невысокую производительность при бурении с призабойной циркуляцией.

Параметрами режима бурения с призабойной циркуляцией являются: частота расхаживания бурового снаряда; высота подъема снаряда над забоем при расхаживании; нагрузка на породоразрушающий инструмент; частота вращения снаряда.

Частота расхаживания — количество двойных ходов снаряда в минуту. С увеличением частоты расхаживания возрастает интенсивность циркуляции жидкости и повышается скорость бурения. Но одновременно с этим происходит и более интенсивное размывание керна, особенно при бурении рыхлых пород.

Высота подъема снаряда над забоем при расхаживании зависит от частоты расхаживания, возрастая при снижении последней. При этом подъем снаряда над забоем в любом случае следует ограничивать 10 см.

Нагрузка на породоразрушающий инструмент зависит от его диаметра и должна находиться в пределах 1500–2500 Н при бурении мягких пород и 2500–4000 Н при бурении твердых пород. Чрезмерная нагрузка на породоразрушающий инструмент приводит к затирке керна, прекращению циркуляции жидкости и, следовательно, к прекращению бурения.

С увеличением частоты вращения снаряда возрастает механическая скорость бурения, что требует увеличения частоты расхаживания снаряда. Это ограничивает предел частоты вращения, которому соответствуют окружные скорости коронки, равные 0,6–0,8 м/с.

Длина рейса определяется течением технологического процесса и при отсутствии геологических ограничений, вытекающих из повышенных требований к выходу керна, составляет обычно 1,5–3 м.

Заклинивание керна производится методом затирки без расхаживания снаряда при несколько повышенной нагрузке на породоразрушающий инструмент.

Технология бурения твердосплавными коронками

Бурение твердосплавными коронками выполняется в рыхлых породах малой и средней твердостей, а также в твердых (V –VIII и частично IX категорий по буримости).

В мягких и рыхлых породах I–IV категорий применяются ребристые коронки М-1; М-2 и КР-3, конструктивной особенностью которых является наличие ребер, приваренных к наружным боковым поверхностям короночного кольца. Наличие ребер обеспечивает увеличенный зазор между стенками скважины и колонковой трубой, что, с одной стороны, благоприятствует циркуляции промывочной жидкости, а с другой — препятствует прихватам колонкового снаряда при вывалах неустойчивых пород со стенок скважины в процессе бурения. Коронки М-1 армированы пластинчатыми резцами и предназначены для бурения однородных пород I–III категорий, а коронки М-2 армированы восьмигранными резцами и используются при бурении перемежающихся по крепости пород II–IV категорий, включая прослои более твердых пород.

Основными параметрами режима бурения являются: нагрузка на породоразрушающий инструмент; частота вращения снаряда; количество подаваемой в скважину промывочной жидкости.

Значения параметров режима твердосплавного бурения зависят от физических свойств пород и типа применяемых коронок.

Заклинивание керна при бурении рыхлых пород производится чаще всего затиркой всухую.

Бурение скважин с промывкой глинистыми растворами

Породы, слагающие месторождения строительных материалов, отличаются либо неустойчивостью стенок скважин (пески, супеси, гравийно-песчаные породы), либо сильной трещиноватостью и кавернозностью (известняки, доломиты), либо способностью набухать при промывке скважин водой (глины, глинистые сланцы).

В таких условиях использование воды в качестве промывочной жидкости оказывается неэффективным, так как не решается одна из главных задач — обеспечение устойчивости стенок скважины в процессе бурения. В подобных случаях в качестве промывочной жидкости используются глинистые растворы.

При бурении рыхлых неустойчивых пород наиболее эффективны малоглинистые растворы, приготовленные на основе полиакриламида ПД-5. Они обладают рядом существенных преимуществ:

- низкое содержание твердой фазы обеспечивает лучшую работоспособность породоразрушающего инструмента и более высокую механическую скорость;
- меньшее гидростатическое давление, создаваемое столбом промывочной жидкости, способствует меньшему ее поглощению;
- улучшаются условия работы насосов;
- снижается стоимость глинистых растворов.

Для того чтобы малоглинистый раствор наиболее полно отвечал требованиям, вытекающим прежде всего из условий очистки скважины от шлама и крепления стенок скважины в процессе бурения неустойчивых пород, параметры раствора должны соответствовать принятым критериям и быть стабильными в течение определенного интервала времени. С этой целью в малоглинистый раствор в качестве реагента-стабилизатора вводятся добавки полиакриламида, гидролизованного в щелочной среде. Для получения 1 л водного раствора реагента ГПД-5 необходимо 50 г товарного полиакриламида, 10 г КОН или NaOH и 50 г $CaCO_3$.

В производственных условиях гидролиз полиакриламида производится в глиномешалках. Компоненты загружаются в глиномешалку в строго определенной последовательности: небольшое количество воды, расчетное количество полиакриламида, щелочи, кальцинированной соды, недостающее до полного заполнения глиномешалки количество воды.

Состав перемешивается в глиномешалке в течение 2–2,5 ч, затем сливается в емкость, где выдерживается в течение суток, необходимых для реакции гидролиза.

Оптимальное содержание гидролизованного полиакриламида в малоглинистом растворе зависит от качества глинопорошка, плотности раствора и ограничений, предъявляемых к водоотдаче малоглинистого раствора конкретными условиями бурения. Так, обработка глинистого раствора, приготовленного из глинопорошка среднего качества, плотностью 1,07–1,08 г/см^3, вязкостью 1,8Н – с/м^2 и водоотдачей 20 см^3, гидролизованным полиакриламидом в количестве 50 г/л, обеспечивает стабильное снижение водоотдачи до 10–12 см^3. Необходимо отметить высокое качество глинистой корки, образующейся в результате фильтрации малоглинистого раствора. Толщина фильтрационной корки не превышает 1 мм, корка получается плотной, не растрескивается при высыхании и не отслаивается от фильтровальной бумаги. Прочностные свойства фильтрационной корки таковы, что она не разрушается при водопроявлениях в скважине.

5.3.3. Алмазное бурение

Область применения алмазного бурения при разведке месторождений строительных материалов ограничивается буровыми работами на месторождениях строительного и облицовочного камня. При этом специфические особенности алмазного бурения заключаются в следующем.

1. Методика изучения трещиноватости, которая является важной частью геологического изучения месторождений строительного камня (особенно облицовочного), в настоящее время определяет минимальный диаметр бурения 93–112 мм.
2. С организационной точки зрения при разведке месторождений строительных материалов предпочтительны самоходные буровые агрегаты. В то же время такие агрегаты не обеспечивают оптимальных условий для использования прогрессивной скоростной технологии, при которой алмазное бурение наиболее эффективно. Прежде всего это относится к высоким скоростям вращения бурильного вала, когда на самоходных агрегатах недостаточная жесткость установки бурового станка способствует возникновению недопустимых вибраций. Кроме того, недостаточный вес самоходного бурового агрегата в сочетании с незначительными глубинами скважин при бурении коронками больших диаметров (312 мм) не может обеспечить условий для создания оптимальных нагрузок на породоразрушающий инструмент.

Перечисленные обстоятельства объясняют причину того, что такие показатели алмазного бурения, как механическая скорость, стоимость 1 м бурения, удельный расход алмазов, довольно далеки от достигнутого в настоящее время уровня.

Технология бурения алмазными коронками диаметром 59–76 мм аналогична общепринятой в настоящее время, за исключением такого параметра, как частота вращения бурильной колонны, которая при использовании самоходных буровых агрегатов, как правило, не превышает 300 об/мин. Это ограничение объясняется, как уже отмечалось выше, возникновением при высоких частотах вращения сильных вибраций не только в колонне бурильных труб, но и в комплексе наземного оборудования.

Необходимая нагрузка на породоразрушающий инструмент (8000–12 000 Н) может быть обеспечена за счет его принудительной подачи. При этом масса самоходных буровых агрегатов достаточна для обеспечения их устойчивости при бурении с принудительной подачей бурового инструмента.

Объем породы, получаемой из керна скважины, пробуренной коронками диаметром 59 мм, достаточен для выполнения комплекса необходимых физи-

ко-механических испытаний и исследований, установленных для конкретного типа месторождений. Но для изучения трещиноватости и ряда других специальных исследований возникает необходимость увеличения диаметра бурения до 93 мм и более.

Бурение алмазными коронками диаметром 93–132 мм требует частоты вращения снаряда 150–400 об/мин. и нагрузки на коронку 12 000–25 000 Н. Самоходные буровые агрегаты в данном случае в состоянии обеспечить оптимальные частоты вращения снаряда, но в ряде случаев, особенно при бурении коронками диаметром 112 мм, не обеспечивается необходимая нагрузка на коронку, что не только отрицательно сказывается на механической скорости бурения, но может послужить причиной (или одной из причин) низких результатов бурения на коронку. Режимы промывки скважины соответствуют общепринятым нормативам.

Определенную трудность при бурении алмазными коронками большого диаметра представляет срыв керна. Из-за отсутствия кернорвателей надежной конструкции и хорошего качества заклинивание керна производится при помощи заклиночного материала (алюминиевая проволока, кусочки фарфора, фаянса и т. д.), что связано с дополнительными затратами времени и не всегда достаточно надежно.

Эффективность алмазного бурения пород IX–X категорий по буримости безусловно превосходит другие известные способы бурения скважин в аналогичных условиях.

Ликвидация поглощения промывочной жидкости методом сухого тампонирования скважин

При бурении скважин на разведке месторождений строительных материалов часто имеют место поглощения промывочной жидкости в трещиноватых и кавернозных породах, а также в породах, отличающихся высокой проницаемостью. Незначительные водопоглощения удается успешно ликвидировать за счет образования на стенках скважины фильтрационной корки и кольматации трещин частицами твердой фазы малоглинистого раствора. В случаях сильной трещиноватости или кавернозности пробуриваемых пород интенсивность поглощения может превысить возможности борьбы с ним при помощи малоглинистых растворов. В этих случаях может быть использован метод изоляции зон водопоглощений и водопритоков сухими тампонирующими смесями.

Во вскрытую скважиной зону водопоглощения или водопритока в колонковом снаряде доставляется быстросхватывающая смесь (БСС) в полиэтиленовой упаковке. Объем смеси принимается с таким расчетом, чтобы

скважина была заполнена ею на 1,5–2,0 м выше кровли поглощающих пород. Затем в скважину на бурильных трубах опускается тампонирующее устройство (рис. 5.15), разработанное Н. К. Липатовым и Г. В. Патрушевым, состоящее из шарошечного долота 1, отражателя 3, выполненного в виде шнека с витками спирали, которые имеют направление, обратное вращению снаряда, обратного шарикового клапана 2 и затирочного элемента 4, выполненного в виде переходника с эластичными радиально установленными лопастями.

Полиэтиленовые брикеты с БСС разбуриваются долотом тампонирующего устройства; быстросхватывающая смесь при этом затворяется водой, и образующаяся масса залавливается отражателем в трещины и каверны с последующей затиркой стенок скважины — затирочным элементом по мере движения тампонирующего устройства от кровли к подошве, зоны водопоглощения (рис. 5.16). Циркуляция промывочной жидкости восстанавливается в самом начале процесса тампонирования, что позволяет в дальнейшем в течение всей

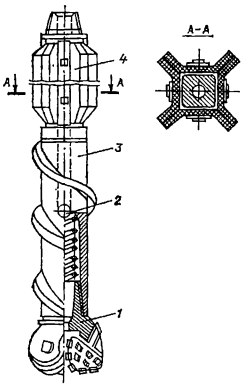


Рис. 5. 15. Тампонирующее устройство: 1 — шарошечное долото; 2 — обратный шариковый клапан; 3 — отражатель; 4 — затирочный элемент

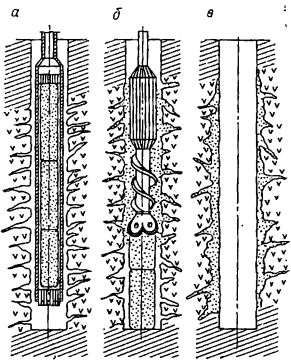


Рис. 5.16. Схема тампонирования скважины: *а* — доставка БСС в зону поглощения; *б* — разбуривание БСС тампонирующим устройством; *в* — скважина с изолированной зоной поглощения

операции по изоляции зоны контролировать надежность тампонирования визуальным наблюдением за характером циркуляции промывочной жидкости.

Способ доставки БСС в скважину и технология ее затворения в зоне водопоглощения позволяют широко варьировать составом смесей путем подбора различных компонентов в зависимости от конкретных условий и задач.

5.3.4. Вибрационное бурение

Область применения и классификация горных пород по буримости для ударно-вибрационного бурения

Под вибрационным бурением понимается способ, при котором буровой инструмент внедряется в грунт с помощью вибрационной или ударно-вибрационной машины.

Вибрационное бурение относится к числу наиболее эффективных при поисках и разведке кирпичных, беложгущихся и керамзитовых глин, песчано-гравийной смеси, известковых туфов, строительных гипсов и др. Его отличительными особенностями являются низкая стоимость, высокая производительность, удовлетворительное качество получаемой геологической информации и опробования.

Накопленным к настоящему времени опытом определены области рационального использования вибромашин для бурения скважин. Поверхностные вибропогружатели со статическим моментом дебалансов 15–25 Н·м, частотой колебаний в минуту 1 000–1 500 и массой 350–700 кг целесообразно использовать для бурения скважин в песчаных, супесчаных, суглинистых, глинистых и отчасти крупнообломочных породах глубиной до 30 м и диаметром до 219 мм с отбором керна по всему интервалу бурения. Вибромашины с более низкими параметрами следует использовать для бурения скважин в тех же породах глубиной до 6 м и диаметром до 104 мм. Портативные вибромашины могут быть использованы для бурения скважин глубиной более 30 м. В указанных условиях вибромашины позволяют повысить производительность буровых работ в 2–3 раза при снижении их стоимости в 1,5– 5 раз.

Опыт применения вибрационного способа бурения свидетельствует о том, что скорости вибробурения снижаются в диапазоне пород от увлажненных супесей и суглинков до пластичных глин, плотных песков и крупнообломочных грунтов. В практике геологоразведочных, изыскательских и других работ используется ряд классификаций горных пород по буримости вибрационным способом. В таблице 5.6 приведена классификация, принятая при инженерно-геологических изысканиях.

Таблица 5.6

Классификация горных пород по буримости для ударно-вибрационного бурения

Категория	Наименование	Время чистого бурения на 1 м, мин		
		Бурение за рейс, м, для интервалов глубин скважин, м		
		0–4	4–10	>10
I	Легко буримые породы, деформирующиеся под собственным весом бурового снаряда: хорошо разложившийся торф и рыхлый почвенный слой; чернозем, рыхлые влажные пески; сильно влажные иловатые болотные и рыхлые песчано-глинистые породы; рыхлый лесс	0,4 2,0	0,8 1,5	1,6 1,0
II	Торф и почвенно-растительный слой с корнями растений (дерн) и редкими включениями гальки и гравия. Неуплотненные пески, супеси и суглинки с примесью (до 10%) мелкой гальки, щебня и гравия. Пластичные глины, суглинки, супеси. Диатомит, увлажненный слабый мел, рыхлый трепел. Лесс средней плотности	0,6 1,5	1,2 1,2	2,4 0,8
III	Супеси и суглинки пластичные с примесью щебня и гравия (10–20%). Плотные глины, супеси, лесс, рыхлые мергели. Мел слабоплотный, каолин. Плывуны и водонасыщенные пески	0,9 1,0	1,8 0,8	3,6 0,6
IV	Плотные пески. Песчано-глинистые пластичные породы с содержанием гравия, гальки или щебня (20–35%). Очень плотные глины, суглинки, супеси, пески. Плотный каолин, слабые аргиллиты. Пористый известняк-ракушечник, гипс. Твердый мел, ангидрит. Мягкий каменный (бурый) уголь. Бокситы, фосфориты. Опоки, за исключением окремненных разновидностей. Мерзлые: глины, супеси, ил, торф. Лед	1,8 0,8	3,6 0,6	7,2 0,4

Помимо бурения скважин вибрационная техника может быть использована для погружения и извлечения обсадных труб, ликвидации аварий в скважинах, связанных с прихватом снаряда на забое, и для выполнения других операций, сопутствующих различным способам бурения.

Вибромашины, виброустановки и виброагрегаты. Инструмент

Номенклатура вибромашин, предназначенных для бурения скважин, включает в себя машины с широким диапазоном характеристик:

Статический момент дебалансов, Н · м	5–70
Частота вращения дебалансов, об/мин.	80К>– 2 000
Масса, кг	50–2 000

Вибромашины в соответствии с их назначением могут быть условно разделены на две группы:

1) безударные вибропогружатели и вибромолоты с мощностью двигателя до 7 кВт, моментом дебалансов до 25 Н·м и массой до 500 кг. Машины предназначены для бурения скважин в нескальных грунтах;
2) безударные вибропогружатели и вибромолоты с мощностью двигателя до 20 кВт и более, моментом дебалансов 70 Н·м и более и массой до 5 т. Машины в основном предназначены для погружения и извлечения труб.

Виброустановкой является буровой агрегат, укомплектованный вибропогружателем и предназначенный для бурения скважин вибрационным способом. Как правило, все виброустановки являются комбинированными, что обеспечивает возможность бурения не только вибрационным, но и каким-либо другим способом. Выпускаются также варианты установок, в которых вибрационный способ является вспомогательным.

Буровой снаряд для вибрационного бурения состоит из бурильных труб и породоразрушающего инструмента (стакана, зонда, желонки или грунтонасоса).

В качестве породоразрушающего инструмента при вибробурении чаще всего используются виброзонды (рис. 5.17, *а*), представляющие собой трубу длиной 1–3 м, имеющую на нижнем конце рабочие кольца, а на верхнем — переходник для присоединения к бурильным трубам. Наиболее употребительны виброзонды диаметром 108, 127, 146 и 168 мм, реже применяются виброзонды диаметром 89 и 219 мм. Рабочее кольцо имеет толщину стенки несколько большую, чем труба. Такое соотношение в размерах кольца и трубы позволяет уменьшить силу трения о породу, препятствующую скорости углубления инструмента.

Для бурения устойчивых связных глинистых пород применяются зонды с одной прорезью с углом выреза 140–160°. В менее устойчивых, но связных породах используются зонды с меньшим углом выреза (90–140°) либо зонды с двумя вырезами. Для бурения слабосвязанных пород используются зонды с клапаном (рис. 5.17, *б*), имеющие одну или две прорези.

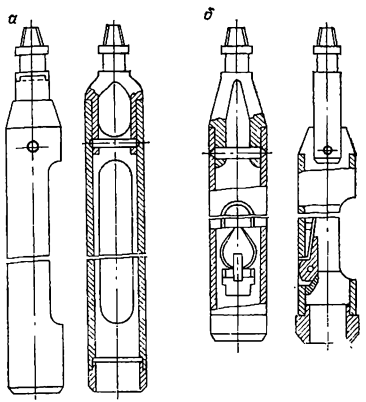


Рис. 5. 17. Виброзонды: *а* — для бурения связных пород; *б* — с клапаном

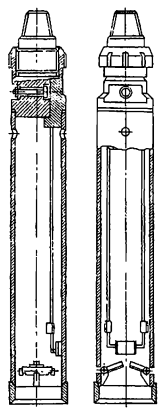


Рис. 5.18. Разъемный виброзонд для бурения слабосвязных пород

Несвязные грунты бурят желонками, входное отверстие которых полностью перекрывается клапаном. Желонки очищаются от породы через верхнее отверстие или через узкую продольную прорезь. Для облегчения операции очистки зонда от породы рекомендуется применять разъемные зонды (рис. 5.18). При бурении валунно-галечниковых отложений целесообразно применять зонды с зубчатыми башмаками.

Технология

Месторождения строительных материалов по условиям вибрационного бурения можно разделить на две группы:

- месторождения, сложенные сухими или слабообводненными устойчивыми породами;
- месторождения, сложенные сухими, сыпучими легкоразрушаемыми или сильно обводненными породами.

При бурении скважин на месторождениях первой группы устанавливается направляющий кондуктор на глубину 2–3 м, и дальнейшее бурение осуществляется без крепления стенок скважины обсадными трубами.

Вибробурение скважин на месторождениях второй группы требует обязательного крепления пробуренного интервала обсадными трубами, а в некоторых случаях — опережающего крепления. Чистка обсадной колонны труб производится инструментом через два диаметра.

Технологическими параметрами вибрационного способа бурения являются: скорость удара, масса ударной части, частота ударов, момент дебалансов, частота колебаний и масса вибровозбудителя; диаметр зонда, длина рейса и продолжительность непрерывного вибрирования. Поставляемые заводами виброустановки комплектуются вибропогружателями с постоянными параметрами, предназначенными для бурения скважин в определенном диапазоне глубин, диаметров бурения и горно-геологических условий. Параметры поставляемых вибропогружателей не регулируются в процессе бурения, за исключением частоты вращения дебалансов, которую в небольших пределах можно изменять за счет частоты вращения приводного двигателя.

При бурении пород, характеризующихся низкой вибробуримостью (плотные слабоувлажненные пески, глины, суглинки), рекомендуется применять вибропогружатели с большим моментом дебалансов; при бурении пород, отличающихся большой вибробуримостью (влажные пески, супеси), — вибропогружатели с высокой частотой ударов. При этом следует иметь в виду, что вибромолоты обеспечивают более высокую производительность по сравнению с безударными вибропогружателями.

При условии, что геологической службой не ставится дополнительных ограничений, рациональная длина рейса может устанавливаться бурильщиком. Предельной длиной рейса является углубка, при которой зонд целиком заполняется породой либо при которой по каким-то другим причинам рейс прекращается. Выполненные Б. М. Ребриком исследования показали, что оптимальная длина рейса должна быть меньше предельной на 5–20%, при бурении в породах, характеризующихся высокой вибробуримостью — 2,5–5 м; при средней вибробуримости длина рейса снижается по мере увеличения глубины скважины, при низкой вибробуримости она существенно ниже, чем в предыдущих случаях, и практически не зависит от глубины скважины.

Начальные интервалы скважины в любых условиях следует пробуривать зондами больших диаметров с постепенным их уменьшением по мере ее углубления. Это вызывает необходимость иметь в комплекте виброинструмента несколько размеров виброзондов и обеспечивает существенный при-

рост рейсовой скорости, получаемой при использовании указанной схемы бурения.

Технико-экономические показатели подтверждают целесообразность широкого внедрения вибрационного способа бурения в практику геологоразведочных работ.

Так, при вибробурении скважин глубиной до 30 м при разведке месторождений керамзитовых глин фактическая производительность составляет более 600 м/станко-месяц при односменной работе.

5.3.5. Вибровращательное бурение

Если встречаются твердые прослои пород, включения крупнообломочного материала бурение вибрационным способом может осложниться. Процесс бурения скважин в таких случаях существенно облегчается, если вибрация снаряда сопутствует его вращению.

На основании проведенного экспериментального и опытного бурения вибровращательным способом установлено, что механическая скорость бурения увеличивается в несколько раз по сравнению с вибрационным способом и в 6–7 раз по сравнению с вращательным.

Поскольку разрушение породы при вибровращательном бурении происходит под совместным воздействием виброударных импульсов и вращения, породоразрушающий инструмент должен сочетать в себе элементы инструмента для вибробурения и коронок, предназначенных для вращательного бурения. Коронки для данного способа изготавливаются в виде конуса, причем не только с наружной, но и с внутренней стороны, где тоже имеется небольшой скос, равный 4°. Зубья коронок армированы твердосплавными резцами, выступающими над торцом на 15 мм.

Исследования показали, что при диаметре бурения 76 мм, частоте вращения дебалансов 1 200 об/мин. наибольшая скорость бурения в пластичных глинах соответствовала частоте вращения бурового снаряда 55–65 об/мин. Максимальная механическая скорость бурения составила 37 м/ч, тогда как при бурении только вибрационным способом она была 8,3 м/ч.

Дальнейшие исследования и производственный опыт ряда геологических организаций подтвердили перспективность вибровращательного способа бурения геологоразведочных скважин диаметром до 250 мм и глубиной 10–40 м в породах до V категории по буримости.

Наиболее рациональные параметры режима вибровращательного бурения (выход керна при этом составляет 100%):

частота вращения бурового снаряда, об/мин.	40–50;
длина рейса, м	1,5–1,7;
оптимальное рейсовое время бурения, с	60–65.

Вибрационное бурение в осложненных геологических условиях

К осложненным геологическим условиям в данном случае отнесено бурение в плывунных породах, в породах, содержащих большое количество валунов, а также бурение скважин глубиной более 20 м.

Водонасыщенные пески при бурении вибрационным способом по всей мощности перекрываются с помощью вибромолота колонной обсадных труб, в нижней части снабженной башмаком с клапанами. Внутри каждой обсадной трубы находится тонкостенная металлическая гильза. После бурения толщи колонна труб извлекается из скважины, а из каждой трубы извлекается гильза с керном. Метод характеризуется высокой точностью описания геологического разреза и может быть эффективно использован при глубинах скважин 15 м и более.

Для бурения крупнообломочных пород применяются зубчатые коронки. Бурение осуществляется с одновременным проворачиванием снаряда вручную.

Встреча зонда и валуна фиксируется внезапным прекращением углубки скважины и возникновением тряски бурильной колонны при работе вибропогружателем. Для успешного продолжения углубки скважины необходимо либо раздробить валун, либо оттеснить его в сторону от зонда или внутрь его. Если это сделать невозможно, необходимо разбурить валун вращательным способом.

Опыт показывает, что вибрационным способом возможно бурение скважин глубиной до 55 м. Основным условием является правильный выбор начального диаметра бурения. При этом чем больше глубина скважины, тем большим должен быть начальный диаметр. В практике работ различных геологоразведочных и изыскательских организаций при бурении скважин глубиной 35–55 м использовались начальные диаметры бурения 27–219 мм, а бурильные трубы — диаметром 63,5 мм.

Погружение и извлечение обсадных труб при помощи вибромашин

Погружение обсадных труб вибропогружателями принципиально не отличается от бурения скважин. Вибропогружатель крепится к верхней части колонны обсадных труб и погружает их на заданную глубину. При необходимости периодически производится чистка забоя желонкой или обычным колонковым снарядом.

Извлечение труб тем труднее, чем дольше они находились в скважине и чем больше их диаметр. Вибромашины за счет вибрационного воздействия, передаваемого колонне и соприкасающимся с ней породам, способны резко уменьшить силы сухого и вязкого трения, приложенные к боковой поверхности обсадных труб. За счет этого необходимое усилие на срыв колонны при ее извлечении может быть уменьшено во много раз.

Вибромашины при извлечении труб следует применять только тогда, когда трубы не поддаются извлечению при помощи лебедки. Все вибромашины характеризуются сравнительно небольшим моторесурсом, поэтому при выполнении данной работы их следует включать на короткие промежутки времени (10–15 мин.) с одновременной натяжкой колонны при помощи лебедки. Когда скорость извлечения труб заметно возрастает и их можно извлечь без применения вибромеханизма, последний необходимо отключить.

Практика работ доказывает, что обсадные трубы диаметром до 273 мм после различного по продолжительности времени пребывания в скважинах (до 2 лет) успешно извлекались при помощи вибромашин, тогда как применение для этой цели мощных лебедок и домкратов грузоподъемностью до 100 т оказывалось безрезультатным. Как правило, для срыва колонны обсадных труб и первоначального подъема (3–6 м) требовалось 5–15 мин. работы вибромашин, после чего обсадные трубы извлекались лебедкой.

5.3.6. Шнековое бурение, область применения и классификация горных пород по буримости

Шнековое бурение как один из видов вращательного способа получило широкое распространение не только в практике геологоразведочных работ, но и при инженерно-строительных изысканиях, бурении взрывных скважин, открытых горных работах и во многих других отраслях промышленности и строительства.

Такое широкое и разностороннее применение — результат ряда существенных преимуществ по сравнению с другими известными способами бурения скважин. Прежде всего шнековое бурение позволяет совместить собственно бурение (непосредственное разрушение породы на забое скважины) с транспортировкой породы с забоя без применения промывки или продувки. При бурении шнеками в скважину не требуется подавать охлаждающую среду (воду, воздух и т. д.), долото достаточно эффективно охлаждается непосредственно породой, в которую внедряется. Это обстоятельство делает данный способ незаменимым для бурения мелких скважин в рыхлых отложениях при

наличии жестких требований к качеству опробования, т. е. при поисках и разведке гравийно-песчаных месторождений.

Характеристикой пород с точки зрения эффективности бурения шнеками является не только показатель буримости, но и степень транспортабельности горных пород шнеками. С учетом этих факторов разработана и принята классификация горных пород для шнекового бурения (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Классификация горных пород для шнекового бурения

Категория	Наименование
I	Грунты иловатые, лёсс рыхлый, суглинки рыхлые, растительный слой и торф с небольшой примесью мелкой гальки и гравия, трепел
II	Глины ленточные, пластичные, песчаные; диатомит, пески рыхлые и грунты песчано-глинистые с примесью (до 10%) мелкой гальки и гравия
III	Глины плотные и суглинки, грунты песчано-глинистые с примесью (101–301%) мелкой гальки, щебня и гравия, лёсс слежавшийся, мел слабый, мергели рыхлые, плывуны, пески сухие, уголь бурый
IV	Ангидрит, бокситы, грунты песчано-глинистые со значительной (>30%) примесью гальки и щебня; глины плотные, вязкие; глины валунные, гипс; известняк-ракушечник пористый, каолин, мел плотный. Мерзлые грунты: ил, песок, суглинки, торф; опока, соль каменная, уголь каменный, фосфориты

Буровые станки и установки. Инструмент

В настоящее время промышленностью выпускается широкий ассортимент станков и установок для шнекового бурения, конструкции которых отвечают требованиям и условиям их использования.

Буровой инструмент шнекового бурения состоит из комплекта шнеков и бурового наконечника (долота). Типы выпускаемых промышленностью шнеков и долот определяются разнообразием геолого-технических условий их применения.

Шнек (рис. 5.19) представляет собой трубу с закрепленной на ней спиралью. Конструкции шнеков различаются между собой главным образом размерами и типом соединений. В настоящее время применяются два основных типа соединения шнеков: шестигранное (рис. 5.19, *б*) и резьбовое (рис. 5.19, *а*).

При бурении мягких пород, содержащих твердые включения в виде гальки и щебня, применение обычных шнеков с толщиной спирали 5–7 мм недостаточно эффективно из-за деформаций и возможных поломок винтовой спи-

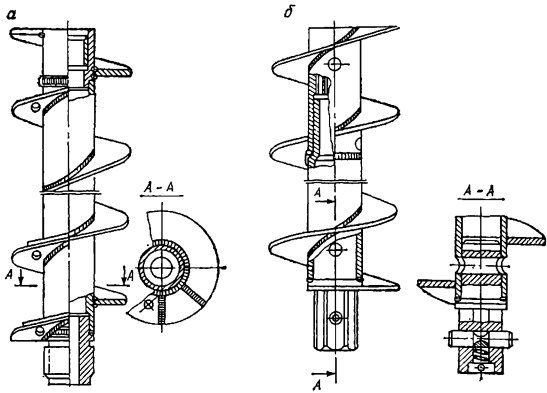


Рис. 19. Шнеки: *а* — с резьбовым соединением; *б* — с шестигранным соединением

рали. В этих случаях рекомендуется непосредственно над долотом устанавливать 1–3 утяжеленных шнека с утолщенными до 8–10 мм спиралями. Эти утяжеленные шнеки помимо своей основной функции по транспортировке породы выполняют задачу УБТ, стабилизируя, работу бурильного вала. Для повышения долговечности шнека применяют также шнеки со сменной спиралью. Износостойкость шнеков при бурении в мягких и рыхлых породах достигает 2000–3000 м.

Для разрушения мягких и рыхлых пород используются долота различной конструкции (рис. 5.20–5.25): трехлопастные (рис. 5.20), змеевикового типа (рис. 5.21), двухлопастные (рис. 5.22), со сменной лопастью (рис. 5.23), лопастные (рис. 5.24), долота с ограничителем скорости подачи (рис. 5.25) и др.

Технология

В отличие от других способов бурения (колонковое, вибрационное и др.) при шнековом бурении долото помимо непосредственного разрушения породы на забое скважины должно обеспечивать ее подачу на спираль шнека.

При бурении мягких пород процесс разрушения породы не требует значительных затрат энергии, и механические скорости при этом могут быть

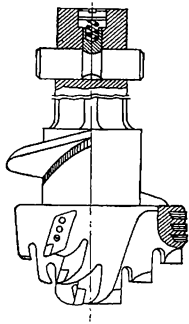


Рис. 5.20. Трехлопастное долото

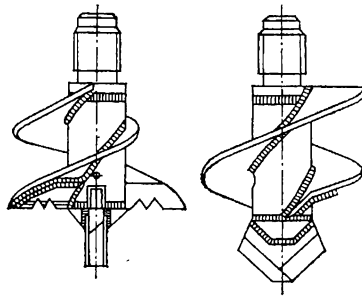


Рис. 5.21. Долото змеевикового типа

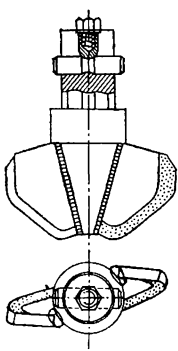


Рис. 5.22. Двухлопастное долото

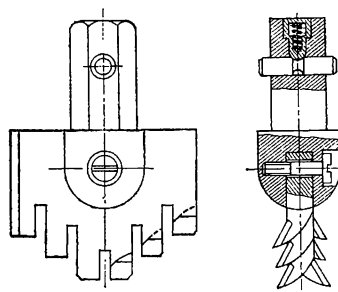


Рис. 5.23. Долото со сменной лопастью

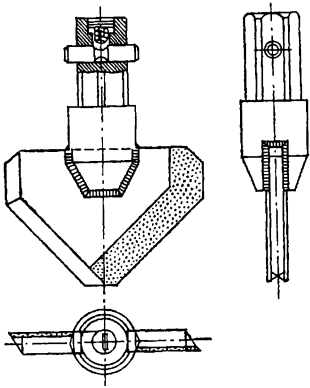


Рис. 5.24. Лопастное долото

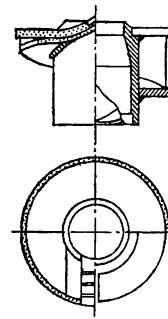


Рис. 5.25. Ограничитель подачи долота

очень высокими. Это предопределяет и большие объемы разрушенной породы, своевременное и полное удаление которой с забоя необходимо для обеспечения высокой механической скорости бурения. Таким образом, эффективность подачи породы долотом на спираль шнека не только приобретает в этих условиях большое значение, но и является решающим фактором, определяющим производительность труда. С учетом этого к конструкции долота предъявляются следующие требования:

- режущие лопасти должны быть максимально приближены к спирали шнека;
- переход лопастей долота на спираль должен быть плавным, без резких уступов;
- режущие лопасти долота должны иметь оптимальные углы резания.

Указанным требованиям наиболее полно отвечают долота змеевикового типа.

Основными факторами технологического режима бурения являются нагрузка на породоразрушающий инструмент и частота вращения бурильной колонны. При бурении в устойчивых песчано-глинистых отложениях процесс углубки скважин идет весьма эффективно. Увеличение нагрузки на породоразрушающий инструмент при этом ведет к росту механической скорости

бурения, но одновременно увеличивается и объем разрушаемой породы, что ограничивает увеличение осевой нагрузки до 400–600 кг. Последняя должна поддерживаться в таких пределах, чтобы подача бурового инструмента находилась в соответствии с возможностями выноса породы с забоя скважины. Как только на шнеках начинают образовываться пробки, что легко отметить по изменению режима работы двигателя, следует уменьшить подачу инструмента и произвести расхаживание бурового снаряда.

Исследованиями установлена прямая зависимость механической скорости бурения от частоты вращения снаряда, причем темп роста скорости выше при бурении рыхлых пород. Оптимальная частота вращения снаряда зависит от комплекса факторов, основными из которых являются физико-механические свойства пород, глубина скважины, мощность привода, конструкция долота и т. д. Оптимальное значение этого параметра находится в пределах 100–200 об/мин. Меньшие значения параметра относятся к бурению вязких пород, более высокие — рыхлых. Увеличение оборотов выше предельных вызывает вибрацию инструмента, которая отрицательно сказывается на транспортировке породы, является причиной поломки инструмента и вызывает ряд других негативных последствий.

В случае бурения неустойчивых пород (сухие и водонасыщенные пески, гравийно-песчаные отложения и т. п.) с целью предупреждения обвалов стенок скважины после подъема снаряда необходимо перед подъемом произвести интенсивное расхаживание его для создания корки и уплотнения ее на стенках скважины. При бурении неустойчивых пород значительной мощности указанный прием недостаточен и не гарантирует устойчивости стенок скважины. В этом случае целесообразно вести бурение с одновременной обсадкой скважины. При этом колонна шнеков вращается внутри колонны обсадных труб, которая под действием собственного веса погружается по мере углубки скважины. Частота вращения снаряда при этом снижается до 70–60 об/мин. Можно использовать в этих случаях и полые шнеки. Оба эти способа, являясь эффективными с точки зрения устойчивости стенок скважины, вместе с тем обеспечивают и наиболее благоприятные условия для выполнения требований опробования. Если при работе шнеков в открытом стволе транспортируемая с забоя порода частично падает со спирали в зазор между шнеком и стенками скважины и частично пополняется породой, падающей со стенок скважины, что в какой-то мере снижает представительность пробы, то при бурении полыми шнеками или с одновременной обсадкой представительность пробы является полной. Если при этом применяется рейсовый метод, когда выбуренная порода не транспортируется на поверхность в процессе бурения,

а вместе с инструментом после бурения ограниченного интервала поднимается на поверхность, то будет обеспечена не только представительность пробы по составу, но и точная фиксация отдельных слоев и литологических разностей продуктивной толщи.

Отбор проб и геологическая документация

В зависимости от требований, предъявляемых к опробованию продуктивной толщи и геологическому изучению разреза, применяется один из следующих приемов опробования и соответствующих ему технологических схем бурения:

- опробование при непрерывной углубке скважины с уточнением глубины, к которой относится взятый образец, при помощи корреляционных коэффициентов;
- опробование при поинтервальной углубке скважины, когда керн с очередного интервала выдается на дневную поверхность холостым вращением колонны шнеков;
- опробование при поинтервальной углубке скважины с подъемом снаряда после бурения каждого интервала и взятием образцов породы непосредственно с лопастей шнеков.

Совершенно очевидно, что наименее достоверным с точки зрения геологического изучения и опробования является первый вариант, а наиболее достоверным — последний; производительность, наоборот, выше в первом и ниже во втором вариантах.

Опробование при непрерывной углубке скважины

При этом способе выбуренная долотом порода непрерывно выдается шнеками на дневную поверхность. Процесс бурения и транспортировка породы совмещены во времени.

Породы в зависимости от их физико-механических свойств транспортируются шнеками на поверхность с различными скоростями. Слабовлажные глины и суглинки отличаются повышенной скоростью перемещения по спирали шнеков, а пластичные и вязкие породы и водонасыщенные пески — пониженной. При внедрении долота в породу, отличающуюся худшими транспортировочными свойствами, чем вышележащая толща, после выдачи на поверхность последнего образца наступает перерыв, указывающий на то, что произошла смена слоев. Если же нижележащая порода более транспортабельна, наблюдается так называемый подпор, заключающийся в частичном смешивании пород на контакте.

Учет поправки на глубину, с которой поднята порода, наблюдения за изменениями режима выдачи породы на поверхность, механической скорости бурения – весь этот комплекс получения информации обеспечивает достаточную точность определения истинных глубин геолого-литологических границ слоев и разностей, обычно равную ±0,3 м. Маломощные прослои (0,5–1,0 м) пород, особенно при глубинах более 15 м, могут быть не обнаружены из-за их перемешивания на спирали шнеков, втирания в стенки скважины и т. д. С точки зрения выхода керна данный способ может считаться достаточно представительным, так как отвечает принятым в настоящее время требованиям.

Опробование с поинтервальной углубкой без подъема снаряда из скважины

Способ отличается от предыдущего тем, что после бурения заданного интервала углубка скважины прекращается и холостым вращением шнеков вся порода, представляющая пройденный интервал, транспортируется на поверхность. Привязка отобранных образцов к конкретным глубинам осуществляется путем их равномерного распределения по длине пройденного интервала.

Точность фиксации геолого-литологических границ при данном способе несколько выше, чем при предыдущем, и зависит от длины интервала бурения. Обычно интервал бурения равен длине шнека (1,3–1,5 м, реже — 3 м), но не менее 0,5–0,7 м, так как при слишком коротких интервалах процентный выход керна сокращается до неприемлемых значений. Точность фиксации границ слоев пород составляет при использовании данного способа 0,1–0,2 м.

Опробование с поинтервальной углубкой и с подъемом снаряда из скважины

Бурение этим способом осуществляется поинтервально. После бурения очередного интервала производится подъем снаряда, с лопастей шнеков отбираются образцы породы для геологической документации и опробования пройденного интервала.

Такой способ бурения может диктоваться как требованиями опробования, так и технико-технологическими условиями. К последним относятся случаи бурения, когда порода плохо транспортируется шнеками вследствие специфических физико-механических свойств или же при больших глубинах бурения, когда необходима слишком большая мощность для транспортировки породы на поверхность.

Требования опробования и геологического изучения ограничивают длину интервала 1,0–2,0 м и требуют, чтобы бурение осуществлялось при понижен-

ной частоте вращения снаряда, а его подача проводилась плавно с целью предупреждения перемешивания породы на лопастях шнеков. После подъема снаряда образцы породы относятся к соответствующим глубинам исходя из соотношения пройденного интервала и длины шнековой колонны, заполненной породой.

Данный способ опробования и геологического изучения разреза является весьма представительным и точным, а в случае, когда бурение ведется с одновременной обсадкой скважины трубами, представительность и точность способа являются практически абсолютными.

Глава 5.4. ОПРОБОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОЦЕНКА ИХ КАЧЕСТВА

5.4.1. Опробование месторождений песка и гравийно-песчаного материала

Песок и гравий представляют собой рыхлые несцементированные осадочные породы, состоящие из окатанных обломков горных пород и минералов различного состава, размеров и формы. Физические и технические свойства песка и гравия определяются крупностью, минеральным составом, формой и характером поверхности слагающих их зерен.

По минеральному составу различают пески кварцевые, кварцево-полевошпатовые, кварцево-глауконитовые и др. Наиболее широко распространены пески смешанного состава с примесью глины, слюды, карбонатных и других минералов.

Гравий чаще всего состоит из обломков наиболее крепких минералов и горных пород: кремня, кварца, гранита, гнейса, диабаза, кварцита и др. Среди крупных фракций гравия нередко в большом количестве присутствуют сланцы, известняки, доломиты и др. По степени окатанности частицы разделяются на окатанные, полуокатанные и угловатые.

Гравийно-песчаным материалом называют рыхлую обломочную горную породу, представляющую собой естественную механическую смесь песка, гравия и более крупных обломков горных пород. В различных отраслях промышленности, использующих песок и гравий, деление их по гранулометрическому составу имеет свои особенности. Наиболее часто к песку относят частицы от 0,05 до 3 мм; к гравию — от 3 до 70 мм, а обломки крупнее 70 мм называют валунами. Исходя из такого деления порода, в которой содержится гравия меньше 10%, считается песком, при содержании в ней гравия больше 10% — песчано-гравийным материалом, а при содержании в песчано-гравийном материале более 5% валунов — валунно-гравийно-песчаным.

Гравийно-песчаные месторождения встречаются почти исключительно в четвертичных отложениях. Ниже перечислены генетические типы отложений, к которым приурочены наиболее распространенные промышленные месторождения.

Флювиогляциальные:

1. Зандровые. 2. Озовые. 3. Камовые. 4. Межмореные.

Аллювиальные:

1. Террасовые. 2. Пойменные. 3. Русловые.

Пролювиальные:

1. Отложения селевых потоков. 2. Отложения конусов выноса.

Морские и озерные:

1. Террасовые. 2. Отложения береговых валов. 3. Прибрежные.

По запасам месторождения подразделяются на мелкие (<1 млн. $м^3$), средние (1– 10 млн. $м^3$) и крупные (>10 млн. $м^3$).

Песок и гравийно-песчаный материал относятся к широко распространенному минеральному сырью, имеют много областей применения и используются в количествах, измеряемых ежегодно сотнями миллионов тонн. С точки зрения количества и в определенной мере качества пески и гравийно-песчаный материал, используемые в народном хозяйстве, могут быть разделены на две группы:

а) массового использования, б) узкоцелевого назначения.

Песок и гравийно-песчаный материал первой группы используются в промышленном и дорожном строительстве (в железобетонных конструкциях, в качестве наполнителя в бетоне, при производстве строительного кирпича, кровельных рулонных материалов и т. д.), второй — в литейном производстве (формовочные пески), в производстве стекла, фарфора, фаянса и в ряде других отраслей народного хозяйства.

Качественные требования к песку и к гравийно-песчаному материалу определяются соответствующими ГОСТами и отраслевыми техническими условиями и включают в себя крупность зерен, химический состав, минерально-петрографическую характеристику и наличие в изучаемой массе глинистых, илистых или пылеватых частиц и органических примесей. Другими словами, основным требованием, предъявляемым к песку и гравийно-песчаному материалу в каждом конкретном случае его использования, является гранулометрический и минерально-петрографический состав, а также чистота, т. е. содержание в них пылеватых, глинистых частиц и органических примесей.

Основные принципы опробования гравийно-песчаных месторождений

При разведке гравийно-песчаных месторождений опробование является главной и наиболее ответственной частью работ. Принципы опробования основаны на качественных требованиях к гравийно-песчаному материалу как сырью, используемому той или иной отраслью промышленности или строительства. Опробование заключается в отборе проб из исходной горной породы, в обработке и доведении их до массы, необходимой для проведения исследований и испытаний.

При опробовании должны быть выполнены следующие условия:

1. Изучение качества гравийно-песчаного материала необходимо осуществлять с учетом возможности его комплексного использования для всех видов строительных работ (группа А). Это условие относится ко всем крупным и средним месторождениям. Для мелких месторождений комплексная оценка качества необязательна. Во всех случаях главное внимание должно быть уделено оценке качества материала по его основному назначению.
2. Опробование должно гарантировать возможность изучения всех полезных компонентов, слагающих исследуемую толщу (песок, гравий, валуны), а также пород вскрыши, если использование их промышленностью возможно и целесообразно.
3. Исследуемая толща должна быть опробована на всю мощность. Если разведка производится до определенного горизонта (например до уровня подземных вод), то по редкой сетке должны быть пройдены и опробованы выработки, полностью вскрывающие всю гравийно-песчаную толщу.
4. Перерывы в опробовании полезной толщи не допускаются (по выработкам не должно быть неопробованных интервалов, даже если эти интервалы представлены некондиционными породами). Исключением могут быть лишь мощные прослои некондиционных пород, необходимость удаления которых при разработке не вызывает сомнений.
5. Опробование должно производиться в соответствии с задачами, характерными для данной стадии разведки.
6. Все пробы, отобранные при проведении как поисковых, так и разведочных работ, изучаются в полевых и в лабораторных условиях с целью определения состава гравийно-песчаной толщи и оценки качества слагающих ее компонентов. Перечень исследований, необходимых для оценки качества материала в зависимости от его назначения, определяется соответствующими ГОСТами и ведомственными техническими условиями. Ниже приводится перечень анализов и испытаний, обычно выполняемых при геологоразведочных работах.

   В полевых условиях:

   а) определение гранулометрического состава продуктивной толщи;
   б) определение петрографического состава гравия и валунов;
   в) определение содержания органических примесей по специальным точечным пробам, отбираемым от нерассеянного гравийно-песчаного материала;
   г) определение объемного веса в целике и коэффициента разрыхления.

В лабораторных условиях:

а) определение гранулометрического состава песка (ситовой анализ) и содержания в нем вредных примесей (органических, пылеватых и глинистых);

б) определение содержания органических и пылевато-глинистых примесей в гравии;

в) минералогический анализ песка;

г) химический анализ песка;

д) комплексные физико-механические испытания песка, гравия, валунов (для определения исходных свойств породы) и щебня, полученного дроблением валунов.

В ряде случаев бывает необходимо выполнить прямые технологические испытания в соответствии с назначением песков или гравийно-песчаного материала.

В зависимости от интервалов отбора проб различают секционное, послойное, послойно-секционное и погоризонтное опробование.

Секционным называется опробование, при котором полезная толща или выделяемый в ней горизонт делятся на несколько частей (секций), в каждой из которых берется отдельная проба. Секции имеют примерно равную длину (интервал отбора пробы), которая бывает различной на разных стадиях разведки. Сечение выработки в пределах одной секции должно быть неизменным.

Послойное опробование представляет собой частный случай секционного, при котором длины секций не равны между собой, а соответствуют мощностям литологически разных слоев, слагающих полезную толщу. Секционные пробы могут отбираться и в пределах мощных литологически однородных слоев. В этом случае опробование называется послойно-секционным.

Погоризонтным называется опробование, при котором интервал отбора проб равен высоте уступа будущего карьера, т. е. соответствует горизонту отработки. Погоризонтные пробы отбираются либо непосредственно в процессе проходки выработки, либо составляются путем объединения первоначально собранных секционных или послойных проб.

В зависимости от назначения различают следующие виды проб:

а) пробы для определения гранулометрического состава гравийно-песчаного материала;

б) пробы для изучения петрографического состава гравия;

в) лабораторные пробы гравия для определения содержания вредных примесей;

г) лабораторные пробы песка для определения гранулометрического состава и содержания вредных примесей;

д) точечные пробы гравийно-песчаного материала для определения содержания органических примесей;

е) технические пробы песка, гравия и валунов для комплексных физико-механических испытаний;

ж) технологические пробы песка, гравия и валунов (щебня из валунов) для комплексных физико-механических и прямых технологических испытаний в строительных растворах, бетоне, битуме и т.д.;

з) пробы песка на минералогический и химический анализы.

Опробование с требуемой степенью детальности должно освещать всю территорию месторождения. Пункты отбора проб для определения гранулометрического и петрографического состава и содержания вредных примесей должны располагаться на площади разведуемого месторождения равномерно, но с учетом изменчивости вещественного состава залежи и детальности разведки. В зависимости от характера изменчивости опробуемые выработки располагаются либо по правильной сетке, либо на разведочных линиях со сгущением в направлении большей изменчивости.

Пробы для комплексных физико-механических и технологических испытаний должны отбираться от всех характерных разновидностей (сортов) материала, отдельно по каждому самостоятельно характеризуемому горизонту и блоку (участку) месторождения.

Представительная конечная масса секционных (послойных) проб устанавливается по формуле

$$Q = 0{,}2\,d^3,$$

где d — максимальный диаметр кусков (зерен) в пробе, см.

Легко рассчитать, что при крупности гравия до 70 мм представительная масса пробы составит около 70 кг. В практике разведки месторождений гравийно-песчаного материала с целью получения достаточного количества материала для лабораторного изучения отдельных фракций при содержании гравия меньше 50% рекомендуется доводить конечную массу пробы до 100 кг.

Конечная масса пробы в этом случае определяется по формуле

$$P = Ql/M,$$

где P — конечная масса секционной или послойной пробы, кг; Q — общая конечная масса всех объединяемых проб (по табл. 1), кг; l — интервал отбора секционной (послойной) пробы, м; M — мощность полезной толщи (или выделенного горизонта) в данной выработке, м.

Материал для петрографической разборки гравия отбирается после рассева секционных (послойных) проб. Разборка производится раздельно по всем фракциям или по одной объединенной фракции гравия в зависимости от характера и стадии разведки месторождения. Материал для петрографической разборки (100–120 зерен) отбирается точечным методом от каждой фракции или от их смеси. Разборка отобранной навески производится простым подсчетом зерен каждой породы с последующим объединением пород в пять технологических групп.

I. Крепкие породы (гранит, сиенит, диорит, кварцит и др.).
II. Породы средней крепости (гнейсы, известняки, песчаники и др.).
III. Слабые породы (сланцы, мел, гипс, слабые песчаники, выветрелые породы и др.).
IV. Вредные для бетонов породы (рудные минералы, содержащие серу или железо, кислые эффузивные породы, известняки, кремни и аморфные модификации кремнезема и др.).
V. Породы, плохо сцепляющиеся с битумом (кварциты, кварцито-песчаники, кремни и др.).

Для определения гранулометрического состава гравийно-пес-чаного материала в процессе проходки выработки отбираются валуны и с помощью шаблона сортируются вручную на две фракции: 70–450 мм и крупнее 450 мм. Гравийно-песчаная масса подвергается рассеву на грохоте через сита с круглыми отверстиями. Обычный набор сит имеет диаметр отверстий 70, 40, 20, 10, 5 и 3 мм. Полученные в результате грохочения фракции взвешиваются, и вычисляется их содержание в горной массе в целых процентах.

При разведке гравийно-песчаных месторождений буровыми скважинами, так же как и горными выработками, необходимо выполнять условия, вытекающие из перечисленных выше принципов и ограничений опробования. Очевидно, что принципы опробования будут соблюдены, если в процессе бурения будет обеспечены следующие условия:

1. Выход керна при бурении по продуктивной толще будет составлять не менее 80%.
2. Масса гравийно-песчаного материала, полученного в виде керна, будет не меньше минимальной конечной массы представительной пробы.
3. В процессе бурения не должно быть искусственного уменьшения или увеличения количества гравийно-песчаного материала.
4. При опробовании по керну должна быть обеспечена надежная фиксация границ литологических разностей толщи, а также границ горизонтов, отличающихся по гранулометрическому или петрографическому составу.

5. Система разведки месторождения должна обеспечивать возможность изучения не только гравийно-песчаной смеси, но и определения содержания валунов, их размеров и петрографической характеристики.

При бурении разведочных скважин вся извлекаемая из скважины порода, объединенная в пределах принятого для опробования интервала, составляет исходную секционную (послойную) пробу. Материал с отдельных рейсов можно объединять в одну пробу только при бурении одним диаметром; при смене диаметра бурения необходимо отбирать новую пробу. Выход керна при бурении определяется сравнением массы фактически поднятого на поверхность материала с рассчитанной по формуле

$$Q = \pi d^2 l \rho / 4,$$

где d — диаметр бурения (внутренний диаметр обсадных труб при бурении желонкой), м; l — мощность интервала опробования (длина рейса), м; ρ — плотность породы, кг/м^3 (для гравийно-песчаного материала, не содержащего валунов, принимается ρ = 1 600 ÷ 1 800 кг/м^3).

Практикой геологоразведочных работ определено, что наиболее целесообразными диаметрами бурения по продуктивной толще являются 6–8", если содержание валунов в ней превышает 3%. При отсутствии валунов или незначительном количестве их диаметр бурения может быть уменьшен до $4^1/_2$" (132 мм). При большом количестве валунов, в том числе крупных, для определения их содержания необходимо наряду с бурением скважин проходить шурфы, а также использовать косвенные методы, но в обязательном сочетании с проходкой шурфов и в тех случаях, когда косвенные методы коррелируются с прямыми.

Глинистые породы

Мировая добыча глинистых пород по приблизительному подсчету превышает 0,5 млрд. т в год. Глинистые породы чрезвычайно широко и разносторонне используются в народном хозяйстве как доступный материал, обладающий рядом ценных технических свойств. Широкой областью использования глин является производство керамических изделий, включающее в себя огнеупоры, кислотоупоры, электротехническую, санитарно-техническую, строительную керамику, фарфор и фаянс. Применительно к требованиям этих отраслей промышленности глинистые породы классифицируются по ряду ГОСТов, которыми предусмотрены следующие признаки: огнеупорность; содержание Al_2O_3 + TiO_2; спекаемость; содержание красящих окислов (Fe_2O_3 и TiO_2); пластичность; дисперсность; содержание крупнозернистых включений (>0,5мм).

Геологическое изучение и опробование месторождений глинистых пород

При поисках и на стадии предварительной разведки необходимо с возможно большей степенью детальности изучить строение толщи полезного ископаемого. Поэтому на этих этапах необходимо опробовать все глинистые породы во всех обнажениях и выработках. Рядовые (массовые) пробы должны отбираться посекционно путем отделения и включения в пробу половины керна по длине. Проба должна включать весь материал опробуемого интервала (секции). Секции в сумме должны охватывать всю мощность опробуемой толщи без пропусков. Длина секции должна соответствовать мощности литологически однородного (визуально) слоя. При большой мощности внешне однородных слоев, когда необходимо исследовать особенности, внешне выражающиеся неясно (например содержание примесей, оцениваемое долями процента), целесообразно ограничивать длину секций. Для большинства случаев в практике разведки месторождений глинистых пород оказываются достаточными секции длиной 0,5–1 м. Секции меньшей длины целесообразно применять только при очевидной возможности выделения таких слоев при эксплуатации. Такими же соображениями следует руководствоваться и при решении вопроса о включении в секции прослоев пустых пород в тех случаях, если невозможно их выделение при добыче.

На стадии детальной разведки, когда внутреннее строение толщи полезного ископаемого изучено достаточно полно, возможно применение послойного опробования с большой длиной секций. Схемы опробования толщ большой мощности или особо сложного строения согласовываются с проектными организациями, осуществляющими подготовку месторождения к эксплуатации.

Рядовые пробы предназначаются для выполнения массовых лабораторных испытаний, программы которых обычно довольно ограничены. Конечная масса этих проб может составлять 1,5– 2 кг.

Для лабораторного исследования технологических свойств глинистых пород отбираются специальные пробы массой 50–200 кг. Конкретная масса пробы согласовывается с лабораторией, производящей исследования. Для отбора этих проб пробуривают специальные скважины большого диаметра или куст скважин (вариант выбирают в каждом конкретном случае с учетом технико-экономических критериев), места заложения которых намечают исходя из условия получения материала, представительного для месторождения. Для месторождений глинистых пород, в которых полезное ископаемое представлено разновидностями технологического назначения, выбор мест заложения

выработок для отбора технологических проб производится с ориентацией на наиболее ценные и преобладающие разновидности.

Масса проб для производства испытаний в промышленных условиях колеблется от нескольких тонн до 2 000 т. Этим, по существу, определяется тип выработок, из которых должны быть отобраны такие пробы: если пробу весом до нескольких тонн можно получить из скважины большого диаметра или из куста скважин, то сотни тонн материала могут быть получены только из горных выработок.

Основными требованиями, предъявляемыми к разведочным выработкам, являются требования к выходу керна. При разведке месторождений глинистых пород выход керна 80% даст надежную основу для геологического изучения и опробования продуктивной толщи. В случае, если полезная толща представлена несколькими слоями различного качественного состава, требование к выходу керна относится не только к толще, но и к каждому слою в отдельности.

Состояние керна должно обеспечивать возможность выделения и полного описания всех литологических разновидностей глинистых пород, встречающихся в разрезе; кроме того, должны быть выделены прослои других пород в полезной толще, а также различные включения с указанием их количества и размеров.

Диапазон глубин залегания полезного ископаемого, физико-механических свойств пород и требований к геологическому изучению и опробованию при поисках и разведке месторождений глинистых пород обуславливает применение следующих способов бурения разведочных скважин:

- колонковое бурение с промывкой водой или глинистыми растворами (разведка месторождений огнеупорных глин);
- колонковое бурение с призабойной циркуляцией (разведка месторождений неглубоко залегающих глинистых пород);
- шнековое бурение и вибробурение (разведка неглубоко залегающих месторождений при наличии комплекса пород, слагающих продуктивную толщу и вскрышу, благоприятного для эффективного использования данных способов бурения);
- бурение скважин большого диаметра (для отбора проб на полузаводские и заводские испытания).

Природные облицовочные материалы

В качестве природных облицовочных материалов используются монолитные горные породы, приобретающие после обработки необходимые декоративные качества и отвечающие заданным требованиям долговечности.

Они используются как для наружной, так и для внутренней облицовки зданий и сооружений различного назначения. Горные породы, используемые в качестве облицовочного материала, классифицируются по генетическому признаку.

Изверженные

Глубинные	**Излившиеся**
Граниты	Базальты, диабазы
Сиениты	Андезиты
Диориты	Пористые вулканические породы
Габбро	Туфовые лавы

Осадочные

Песчаники (кремнистые, известковые)
Известняки и известковые туфы
Доломиты
Гипсовый камень

Метаморфические

Кварциты
Мрамор (цветной и белый)

Требования, предъявляемые к природным облицовочным материалам, разделяются на две группы:

1. Геологические, горнотехнические и экономические (характер залегания полезного ископаемого, гидрогеологические условия, запасы, расположение месторождения, возможные транспортные коммуникации и др.).
2. Качественные, зависящие от области и условий применения (монолитность полезной толщи месторождения и возможность получения блоков заданных размеров, декоративность, долговечность, прочность, степень истираемости и др.).

Монолитность породы, предназначенной для облицовочного материала, является обязательным требованием, поскольку она обеспечивает получение блоков заданного размера. Густота и направление трещин отдельности в толще пород во многом определяют выбор системы разработки. Для правильной оценки качества облицовочного камня необходимо выяснить максимальные размеры блоков, которые могут быть добыты, а также общий процент выхода блоков, отвечающих требованиям ГОСТ.

Декоративные качества облицовочных материалов являются важным фактором при строительных работах. Наиболее полно они определяются в лаборатории, но имеются методы, позволяющие сделать приблизительную оценку декоративности и в полевых условиях.

Разведка месторождений природных облицовочных материалов производится в основном скважинами и поверхностными горными выработками, которые проходятся с целью отбора технологических проб.

Известняки и доломиты

По ориентировочным подсчетам мировая добыча известняков составляет 1,5 млрд. т в год.

По физическим, химическим и технологическим свойствам известняков применение их в промышленности делится на четыре группы:

1. Производство вяжущих веществ, химическая и сахарная отрасли промышленности (решающее значение имеет химический состав, а физико-механические свойства изучают менее детально);
2. Металлургия (важен химический состав и физико-механические свойства);
3. Строительство, где известняк используется как бутовый камень, щебень для бетонных и дорожно-строительных работ, а также для балластировки железнодорожных путей (главное значение имеют физико-механические свойства, а химический состав практически не учитывается);
4. Отрасли строительства, где известняк используется в качестве стенового, облицовочного и строительного камня (кроме физико-механических свойств важно получение штучного камня правильной формы и определенных размеров наряду со способностью к распиловке и полировке).

Опробование месторождений известняков и доломитов

Для химических анализов отбор проб производят из керна, раскалывая его пополам. Дальнейшая обработка: дробление, истирание, смешение и квартование — производится по общепринятой методике. Конечная масса проб 100–200 г.

Для физико-механических испытаний отбирают куски керн, или выпиливают штуфы определенного размера. Масса пробы известняка, предназначенного для производства извести, составляет 20–50 кг, для технологических испытаний в бетоне — 50 кг.

Пробы облицовочного известняка отбираются в виде образцов, позволяющих определять декоративные качества после обработки. Для полузаводских и заводских испытаний пробы отбираются валовым способом, их масса (десятки, а иногда и сотни тонн) согласовывается с организацией, которая будет производить испытания.

Количество отбираемых проб зависит от стадии разведочных работ и назначения известняков. При разведке известняков для нужд металлурги-

ческой промышленности, для вяжущих материалов, химического, сахарного и стекольного производства пробы для химических анализов отбираются послойно или посекционно во всех выработках, а для физико-механических испытаний — только от основных разновидностей в отдельных характерных выработках.

Для лабораторных технологических испытаний берутся 1–3 пробы от всех разновидностей известняков. Пробы для полузаводских и заводских испытаний берутся в 1–2 характерных для данного месторождения пунктах.

На месторождениях штучного строительного камня и щебня для физико-механических испытаний отбираются послойные и секционные пробы во всех выработках (для химических анализов только единичные).

При разведке известняков для облицовочного камня отбирается по нескольку проб от каждой промышленной разновидности известняков для всесторонних технологических испытаний. На всех стадиях геологоразведочных работ, от поисков и до детальной разведки включительно, производится изучение качества известняков. Это изучение заключается в следующем: геолого-литологическое изучение карбонатной толщи; опробование полезной толщи; анализы и испытания проб.

5.4.2. Оценка качества сырья

Оценку качества песчано-гравийного сырья и пригодности его использования в различных видах строительных работ начинают в период полевых работ при проведении рассевов с петрографической разборкой. Выявляемое при такой разборке содержание зерен пластинчатой и игловатой форм (поперечный размер меньше длины в три и более раз) регламентируют в зависимости от группы (1–4) до 15–25–35–50% соответственно. Содержание зерен слабых пород допускают: для щебня и гравия высоких марок (1 000–1 400) — не более 5%; для низких марок (300) — не более 15%.

Лабораторные испытания выполняют по методикам, описанным в ГОСТах. Лабораторные определения физико-механических свойств на отобранных пробах дают полное представление о качественной характеристике сырья. Они в большинстве случаев являются достаточными для оценки промышленной значимости месторождения. При этом полезно привлекать данные о промышленном использовании сырья аналогичных месторождений.

На поисковой стадии геологоразведочных работ прогноз качества глин основывается на результатах изучения их минерального и элементного составов, состава и емкости обменного комплекса, кристаллохимических особенностей породообразующих минералов, их генетической природы, содер-

жания вредных и инертных примесей. Наиболее информативными и оперативными методами исследования на этой стадии являются рентгеновский фазовый анализ глинистых минералов, определение химическим путем содержания кварца, емкости и состава обменного комплекса. На этой основе устанавливают вещественный состав глины, степень ее чистоты от примесей, ориентировочную долю породообразующего смектита, палыгорскита или других минералов. Полученная информация позволяет прогнозировать ориентировочные технологические свойства глин и направления их возможного использования.

На оценочной стадии производят лабораторно-технологические испытания глин на групповых или укрупненных пробах сырья, уточняя качество и области применения.

В процессе разведки месторождения проводят полузаводские технологические испытания сырья, определяют технологию его переработки и области применения.

Все пробы глинистых пород, идущих для производства цемента, керамических изделий, керамзита, огнеупоров и формовочного сырья, подвергаются механическому анализу с установлением степени их засоренности обломочным материалом, а также с определением состава и размеров крупных включений.

Для бентонитовых глин, используемых в качестве адсорбентов или для производства окатышей, определяются набухаемость, обменная емкость, содержание водорастворимых солей.

Пригодность глинистых пород для производства огнеупоров и керамических изделий всех видов определяется по данным керамических испытаний. Возможность использования глинистых пород устанавливают:

- для огнеупорной промышленности — по огнеупорности и водопоглощению образцов, обожженных при контрольной температуре, спекаемости, связующей способности;
- для производства керамических изделий — по дисперсности, пластичности, механической прочности в воздушно-сухом состоянии, температуре спекания;
- для керамзита — по пластичности, температуре вспучивания.

При этом должны быть определены: полное водосодержание, коэффициент чувствительности к сушке, воздушная усадка; для огнеупорного сырья: изготовлены пробные керамические массы, установлена температура спекания, проведен обжиг на разных температурах, на обожженных образцах определены водопоглощение, полная усадка, временное сопротивление сжатию и изгибу, пластичность, связность, зерновой состав.

Результаты лабораторных исследований, как правило, проверяются в полупромышленных условиях. Проверке и уточнению подлежит оптимальная технологическая схема подготовки и производства готовых изделий.

Для бентонитовых, огнеупорных глин и керамзитового сырья результаты лабораторных исследований проверяются в промышленных условиях.

Для оценки качества кварцевых песков определяют их химический, минеральный, зерновой составы и модуль крупности, содержание глинистых и илистых частиц, плотность, пустотность, а для песков, потребляемых в автодорожном строительстве, для бетона, силикатных изделий, тонкой керамики и др. — также коэффициент фильтрации, содержание серно-кислых и сернистых соединений, реакцию водяной вытяжки и другие показатели, регламентируемые нормативными документами на готовую продукцию.

Изучение минерального, зернового составов и других особенностей песков имеет важное значение не только для оценки качества их в природном виде, но и для предварительного заключения об их вероятной промышленной пригодности и о свойствах.

При исследовании обогатимости кварцсодержащих песков изучают измельчаемость и иногда дробимость; проводят ситовой, гравитационный и магнитный анализы; определяют основные группы минералов-железоносителей; выбирают метод и технологическую схему обогащения (определяют технологическую ценность песка, проводят исследования по доводке кварцевого концентрата и отходов обогащения); изучают физико-химические свойства концентрата.

В процессе исследований определяют:

- состав (%): SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O, S, ПО (исходного песка и конечного концентрата); содержание Fe_2O_3 (%) в хвостах обогащения;
- содержание железа в форме (%): железосодержащих слюд; магнетита и гематита, карбонатов, гидроксидов, сульфидов и сульфатов, пленок силикатов железа; твердых и газожидких минеральных включений и структурных примесей;
- содержание элементов (спектральный полуколичественный анализ) (%): Mo, Co, N, Cu, Cr, W, Bi, Sn, Sb, Ag, Pb, Zn, As, Be, In, Ge, Sr, Ba, Zn, Hf, La;
- минеральный состав (%); кварц, полевые шпаты, магнетит, гематит, гидроксиды, силикаты и сульфаты, железо и марганец; анатаз, рутил; глауконит, каолинит, доломит;
- вкрапленность рудных минералов (мм);
- гранулометрический состав исходной пробы;

– физические свойства: магнитную восприимчивость; истинную плотность ($т^3/м$); насыпную плотность ($г/см^3$); угол естественного откоса (градус); контрастность и фракционный состав по плотности 2,7; 2,9; 3,2 и 4,2 $т/м^3$. При исследовании на обогатимость наиболее важным является поведение железорудных минералов при различной обработке песков.

Технологические испытания песков для автодорожного строительства проводят в составе асфальто- и дегтебетонных смесей, асфальтобетона и дегтебетона, их выполняют специализированные организации по стандартным методикам.

При оценке сырья определяют плотность (истинную и среднюю), пористость, водопоглощение, морозостойкость, предел прочности при сжатии и другие параметры. Эти параметры определяют в соответствии с нормативными документами, приведенными в приложении.

Разработку и полупромышленную проверку технологии подготовки производят на специальных установках.

Глава 5.5. ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 (обязательное)

Группы сложности горно-геологических условий

Факторы	I (простая)	II (средней сложности)	III (сложная)
Геологические	Полезная толща представлена 1-2 видами грунтовых строительных материалов выдержанной мощности и однородного состава	В полезной толще представлено до трех видов грунтовых строительных материалов изменчивой мощности и неоднородного состава	В полезной толще представлено до пяти видов грунтовых строительных материалов изменчивой мощности с вклиниванием слоев, с линзами и прослоями некондиционных грунтов, весьма неоднородного состава и качества
Гидрогеологические	Подземные воды отсутствуют или не влияют на условия разработки	Полезная толща полностью обводнена. Подземные воды несущественно осложняют условия разработки	Полезная толща полностью обводнена, водоносный горизонт (горизонты) имеет невыдержанный характер, местами может быть напорным, осложняет условия разработки и ухудшает качество грунтовых строительных материалов при их разработке
Техногенные	Отсутствуют	Отвалы и отходы однородного состава - полезная толща представлена одним видом грунтовых строительных материалов с закономерным их формированием	Отвалы и отходы неоднородного состава — в полезной толще представлено до трех видов грунтовых строительных материалов с незакономерным их формированием, вклиниванием слоев, с линзами некондиционной породы
Состояние и свойства	Состав, состояние и физико-механические свойства грунтовых строительных материалов однородные в плане и по глубине; для оценки качества достаточно лабораторных определений	Состав, состояние и физико-механические свойства грунтовых строительных материалов изменяются в плане и по глубине; для оценки качества необходимо выполнять, как правило, опытные полевые работы	Состав, состояние и физико-механические свойства грунтовых строительных материалов весьма неоднородны и изменчивы в пространстве; для оценки качества необходимо, кроме опытных полевых работ, выполнять при соответствующем обосновании и опытно-производственные исследования. В полезной толще имеют ограниченное

Продолжение приложения 1

Факторы	I (простая)	II (средней сложности)	III (сложная)
			распространение специфические грунты (вечномерзлые, засоленные, с примесью растительных остатков и др.), изучение свойств которых требует дополнительных исследований
Геологические и инженерно-геологические процессы	Отсутствуют	Имеют ограниченное распространение и существенно не осложняют систему разработки	Имеют широкое распространение, осложняют систему разработки, требуется осуществление защитных мероприятий и ограничений
Показатели качества	Качество грунтовых строительных материалов отвечает требованиям нормативных документов по проектированию земляных сооружений, в технической мелиорации потребности нет	Качество грунтовых строительных материалов не по всем показателям отвечает требованиям нормативных документов по проектированию земляных сооружений, требуется осуществление простейших методов технической мелиорации	Качество грунтовых строительных материалов изменчиво в плане и по глубине и без осуществления сложных методов технической мелиорации материалов не пригодно для укладки в земляное сооружение; после осуществления технической мелиорации грунтовые строительные материалы не по всем показателям отвечают требованиям нормативных документов по проектированию
Горно-технические	Соотношение мощностей вскрыши и полезной толщи не превышает 0,25, полезная толща имеет достаточную и выдержанную мощность, однородна по составу, позволяет использовать эффективную систему разработки отдельных видов грунтовых строительных материалов	Мощность вскрыши значительна и соотношение с, полезной толщей находится в пределах 0,25-1,0; полезная толща изменчива по мощности и качеству, местами мощность недостаточная, что осложняет систему разработки, создает ограничения с применением механизмов	Мощность вскрыши изменчива в плане и по глубине, соотношение с полезной толщей превышает 1,0; полезная толща имеет неровную кровлю и подошву, изменчива по мощности, составу и видам грунтовых строительных материалов, система разработки осложнена из-за недостаточной и невыдержанной мощности полезной толщи отдельных видов грунтовых строительных материалов

Окончание приложения 1

Факторы	I (простая)	II (средней сложности)	III (сложная)
Технологические	Укладка грунтовых строительных материалов в земляные сооружения не имеет ограничений и осложнений и может быть осуществлена с применением эффективных механизмов, потребности в выполнении опытно-производственных исследований нет	Укладка грунтовых строительных материалов в земляные сооружения имеет ограничения; не могут быть использованы некоторые эффективные механизмы; для определения оптимальных способов и технологии укладки целесообразно выполнять опытно производственные исследования	Укладка грунтовых строительных материалов в земляные сооружения весьма сложна, с ограничениями и дополнительными мероприятиями в технологии; требуется выполнение, как правило, технической мелиорации в процессе производства работ и (или) производства опытно производственных исследований по определению оптимальных способов и технологии укладки грунтовых строительных материалов в земляное сооружение

Примечание. Группу сложности горно-геологических условий исследуемой площадки (участка) следует устанавливать по наибольшему количеству факторов, относящихся к данной группе.

Приложение 2 (рекомендуемое)

Виды, характеристика и условия отбора проб грунтовых строительных материалов

Виды проб	Характеристика и условия отбора проб
Образцы пород (монолиты, штуфы)	Отбор типичных и аномальных образцов связных и скальных грунтов ненарушенной и нарушенной структуры для определения состава, состояния и свойств
Послойные	Отбираются чаще нарушенной структуры из отдельных прослоев, линз, слоев мощностью до 2-5 м из всех видов грунтовых строительных материалов как полезной толщи, так и вскрышных пород для определения состава, состояния и свойств отдельных видов грунтовых материалов
Поинтервальные (секционные)	Отбираются только нарушенной структуры из всех видов однородных грунтовых строительных материалов как значительной мощности (более 2–5 м), так и при переслаивании разнородных видов и невозможности их раздельной разработки. Поинтервальное опробование может дополняться отбором послойных проб
Групповые (объединенные)	Отбираются из одного или нескольких видов грунтовых строительных материалов из одной или нескольких выработок из навесок, пропорциональных их мощностям, для получения достоверных средних характеристик
Полузаводские (технологические)	Отбираются значительные массы грунтовых строительных материалов из одной или нескольких представительных выработок для опытно-производственных испытаний по установлению возможности и методов технической мелиорации или оптимальных способов и технологии укладки грунтовых строительных материалов в земляное сооружение

Приложение 3 (рекомендуемое)

Способы и условия отбора проб грунтовых строительных материалов

Способы отбора проб	Условия отбора проб
Точечный	Отбор представительных (характерных) или аномальных (загрязненных) образцов пород ненарушенной и нарушенной структуры (монолиты, штуфы и т.п.). Применяется при необходимости для всех видов грунтовых строительных материалов в комплексе с другими видами опробования
Валовый (послойно-интервальный)	Применяется для отбора послойных, поинтервальных (секционных) и групповых (объединенных) проб всех видов грунтовых строительных материалов, за исключением скальных грунтов, посредством включения в начальную пробу всего извлекаемого из выработки или их групп материала, при необходимости с последующим сокращением квартованием или иным способом до конечной массы проб (приложение Ж). Этот способ отбора проб рассматривается в качестве основного, так как позволяет обеспечить наиболее достоверные средние показатели качества грунтовых строительных материалов
Бороздовый	Используется для отбора проб скальных пород и глинистых грунтовых материалов из устойчивых стенок выработок посредством проходки борозды шириной 10-20 см и глубиной 5-10 см или иного сечения с целью получения необходимой массы проб. Применяется чаще в комплексе с другими способами опробования
Задирковый	Применяется для отбора проб скальных пород и глинистых грунтовых материалов из керна буровых скважин посредством среза по его длине одинакового сечения необходимого объема материала. Используется редко и обычно в комплексе с другими способами опробования с целью определения отдельных показателей свойств грунтовых строительных материалов
«Кратной бадьи»	Включение в начальную пробу материала каждой 2, 4, 8 или 10 бадьи, извлекаемой из шурфа (дудки) соответственно 50; 25; 12,5 или 10% опробуемого материала. Применяется преимущественно при отборе проб крупнообломочных грунтовых строительных материалов и отходов

Приложение 4 (рекомендуемое)

Масса проб для лабораторных определений и технологических испытаний грунтовых строительных материалов

Виды проб	Комплекс лабораторных определений и технологических испытаний	Виды фунтовых строительных материалов	Масса проб, кг	Стадии (этапы) проектирования*
Образцы пород	Сокращенный	Все виды	до 1–5	Предпроектная документация
Послойные, поинтервальные и групповые	То же	Глинистые, песчаные, отвалы, отходы без твердых включений, отсевы песчаных фракций из крупнообломочных грунтов	2–5	То же
То же	—»—	Крупнообломочные, песчаные, отвалы, отходы с включениями размером до 40 мм	10–30	—»—
—»—	—»—	То же с включением размером до 100 мм	50–70	—»—
Образцы пород	Полный	Все виды	2–30	Проект и рабочая документация
Послойные, поинтервальные и групповые	То же	Глинистые, песчаные, отвалы, отходы без твердых включений, отсевы песчаных фракций из крупнообломочных грунтов	5–10	То же
То же	—»—	Крупнообломочные, песчаные, отвалы, отходы с включениями размером до 40 мм	20–50	—»—

Окончание приложения 4

Виды проб	Комплекс лабораторных определений и технологических испытаний	Виды фунтовых строительных материалов	Масса проб, кг	Стадии (этапы) проектирования*
—»—	—»—	То же с включениями размером до 100 мм	50–100	—»—
Полузаводские (технологические)	Полный и технологические испытания (п. 5.12)	Все виды	2000–10000 и более	Рабочая документация

* При обосновании в программе изысканий допускаются отклонения (п.п. 6.2 и 7.3).

Примечание. Масса проб скальных пород устанавливается в программе (предписании) изысканий с учетом способов их отбора (приложение Е) и комплекса лабораторных определений и технологических испытаний.

Приложение 5 (рекомендуемое)

Виды лабораторных определений состава, состояния и свойств грунтовых строительных материалов

Комплекс лабораторных определений	Лабораторные определения	Виды грунтовых строительных материалов				
		Глинистые	Песчаные	Крупнообломочные	Скальные	Отвалы и отходы
Сокращенный	Гранулометрический состав	+	+	+	—	+
То же	Границы текучести и раскатывания	+	—	дз	—	дз
—»—	Природная влажность	+	дз	дз	дз	дз
—»—	Плотность	дз	дз	дз	+	дз
—»—	Плотность сухого грунта	дз	дз	дз	+	дз
—»—	Засоленность	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Содержание растительных остатков	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Набухание	дз	—	дз	—	дз
—»—	Коэффициент фильтрации при заданной плотности	дз	дз	дз	—	з
Полный	Гранулометрический состав	+	+	+	—	+
То же	Микроагрегатный состав	+	—	—	—	дз
—»—	Петрографический состав	—	—	+	+	дз
—»—	Минералогический состав	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Валовый химический состав	дз	дз	дз	дз	дз
—»—	Границы текучести и раскатывания	+	—	дз	—	дз
—»—	Природная влажность	+	+	+	дз	+
—»—	Гидроскопическая и капиллярная влажность	дз	дз	—	—	дз

Продолжение приложения 5

Комплекс лабораторных определений	Лабораторные определения	Виды грунтовых строительных материалов				
		Глинистые	Песчаные	Крупнообломочные	Скальные	Отвалы и отходы
—»—	Плотность	+	+	+	+	+
—»—	Плотность сухого грунта	+	+	+	+	+
—»—	Засоленность	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Содержание растительных остатков	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Набухание	дз	—	дз	—	дз
—»—	Коэффициент фильтрации при заданной плотности	дз	+	дз	—	дз
—»—	Максимальная молекулярная влагоемкость	дз	дз	—	—	дз
—»—	Максимальная плотность и оптимальная влажность	+	+	дз	—	дз
—»—	Плотность в максимально плотном и рыхлом состоянии	—	+	дз	—	дз
—»—	Плотность насыпного грунта	—	—	дз	—	дз
—»—	Плотность частиц грунта	+	+	дз	—	дз
—»—	Угол естественного откоса (в воздушно-сухом состоянии и под водой)	—	+	дз	—	дз
Полный	Растворимость	—	-	дз	дз	дз
Тоже	Размокаемость	дз	—	—	—	дз
—»—	Удельное водопоглощение	—	—	дз	+	дз
—»—	Содержание слабых пород	—	—	+	—	дз
—»—	Коэффициент выветрелости	—	—	дз	дз	дз

Окончание приложения 5

Комплекс лабораторных определений	Лабораторные определения	Виды грунтовых строительных материалов				
		Глинистые	Песчаные	Крупнообломочные	Скальные	Отвалы и отходы
—»—	Содержание фракций пластинчатой и лещадной формы	—	—	+	—	дз
—»—	Окатанность и форма зерен	—	дз	дз	—	дз
—»—	Модуль крупности	—	+	дз	—	дз
—»—	Морозостойкость	—	—	дз	дз	дз
—»—	Истираемость	—	—	дз	дз	дз
—»—	Липкость	+	—	дз	—	дз
—»—	Относительное морозное пучение	дз	дз	—	—	дз
—»—	Сжимаемость при заданной плотности и влажности	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Сопротивление срезу при заданной плотности и влажности	дз	дз	дз	—	дз
—»—	Временное сопротивление одноосному сжатию в водонасыщенном и воздушно-сухом состоянии	-	—	дз	дз	дз

Обозначения:

\+ определения выполняются;

— определения не выполняются;

«дз» — определения выполняются по дополнительному заданию или требованию отраслевых норм.

Раздел 6. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ, ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ, РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ВИДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время основная цель любых гидрогеологических исследований — обеспечение успешного научно обоснованного решения поставленных задач при минимальных затратах труда, времени и средств. Это требование, соответствующее одному из основных принципов геологоразведочного процесса – принципу наименьших трудовых и материальных затрат, обеспечивается в каждом конкретном случае путем обоснованного выбора и осуществления наиболее рационального в рассматриваемых природных и экономических условиях комплекса гидрогеологических и других видов исследований.

Геологическая и экономическая эффективность выполняемых исследований существенно повышается при разумном и обоснованном сочетании и правильной последовательности выполнения различных видов гидрогеологических, геофизических, гидрохимических, ядерно-физических и других исследований; при замене более дорогостоящих и длительных по времени проведения видов исследований более дешевыми и быстрыми методами без снижения или при допустимых пределах снижения достоверности получаемых результатов, при обеспечении взаимоконтроля результатов исследований различными методами и условий для интерполяции и экстраполяции результатов, выполняемых в отдельных точках более достоверных и дорогостоящих видов исследований на всю изучаемую территорию; при более полном использовании разрешающей способности и возможностей каждого из видов применяемых исследований и т. д.

Необходимость комплексирования различных видов исследований, кроме того, определяется большой широтой и спецификой круга вопросов, которые приходится решать при гидрогеологическом изучении месторождений подземных вод.

Наиболее благоприятные возможности для эффективного сочетания собственно гидрогеологических и вспомогательных методов исследований (аэрофотосъемка, индикационные наблюдения, геофизические методы исследований и др.) представляются на первоначальных этапах изучения (региональные и поисково-съемочные работы, предварительная разведка), когда эти исследова-

ния проводятся на значительных площадях, в массовом количестве и при более низких требованиях к их достоверности. Однако это не исключает возможности их эффективного использования и на последующих стадиях изучения и геолого-промышленной оценки подземных вод, тем более, что техника и методика специальных видов исследований непрерывно совершенствуются, а их разрешающая способность и эффективность применения возрастают.

Глава 6.1. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Геофизические методы приобретают все большее значение при решении самых разнообразных гидрогеологических задач практически на всех стадиях проведения гидрогеологических исследований. Их относительная дешевизна, наличие серийно выпускаемой аппаратуры, простота и оперативность проведения исследований, возможность повышения разрешающей способности и степени достоверности за счет комплексирования различных видов геофизических исследований между собой и с гидрогеологическими методами, высокая геологическая информативность и некоторые другие факторы предопределяют большие перспективы и высокую экономическую эффективность применения геофизических методов при гидрогеологических исследованиях. Широкое внедрение геофизических методов в практику поисково-разведочных гидрогеологических работ — один из реальных путей повышения их геологической и экономической эффективности, сокращения материальных, трудовых и временных затрат, повышения производительности труда.

Одним из основных условий, определяющих эффективность выполняемых исследований, особенно на стадии поисково-съемочных работ, является опережающее проведение геофизических работ. Оно обеспечивает возможности корректировки объемов и более целенаправленного выполнения основных дорогостоящих видов исследований (поисково-разведочного бурения и опробования скважин). Это, тем не менее, не исключает возможности и необходимости проведения отдельных геофизических работ одновременно или после гидрогеологических. Применение геофизических методов, как известно, основано на использовании естественных или искусственно создаваемых физических полей: магнитного и гравитационного полей Земли (магниторазведка и гравиразведка), естественных или искусственно создаваемых электромагнитных полей (электроразведка), полей упругих колебаний (сейсморазведка), термических полей (термометрия); полей ореолов рассеяния отдельных

элементов (радиометрические и ядерно-физические методы). Изучение этих полей, выявление и интерпретация геофизических аномалий, предопределяемых особенностями геологического строения и гидрогеологических условий изучаемых объектов, как раз и являются той основой, на которой зиждется применение геофизических методов исследований в гидрогеологии.

В зависимости от условий применения выделяют наземные геофизические исследования (полевая геофизика) и геофизические исследования в скважинах (буровая геофизика). Наземные геофизические исследования (электроразведка, сейсморазведка; магниторазведка, гравиразведка и др.) имеют в основном площадной характер и используются главным образом при проведении поисково-съемочных работ и изучении гидрогеологических условий месторождений подземных вод с поверхности.

Геофизические исследования в скважинах проводятся практически на всех стадиях изучения подземных вод, но преобладают на стадиях предварительной и детальной разведки и заключаются главным образом в осуществлении различных видов каротажных работ. Они используются для изучения и количественной оценки разреза скважин и обеспечивают наземные геофизические исследования основой для геологической привязки получаемых результатов, а также параметрическими значениями физических свойств горных пород (для интерпретации результатов). В свою очередь наземные геофизические исследования обеспечивают обоснованную экстраполяцию гидрогеологических показателей, выявляемых в результате каротажа скважин.

Наземные геофизические методы. Наибольшее распространение в практике гидрогеологических исследований получили методы электроразведки, основанные на изучении естественных и искусственно создаваемых переменных и постоянных электромагнитных полей. Среди многочисленных методов электроразведки наиболее эффективными для решения гидрогеологических задач являются те, которые основаны на изучении полей постоянного тока: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электрическое профилирование (ЭП) и метод вызванной поляризации (ВП).

Методы ВЭЗ и ЭП позволяют на основе определения кажущегося сопротивления среды судить о литолого-петрографическом составе пород, их влажности, величине минерализации подземных вод, водно-физических свойствах пород, степени их трещиноватости и т. п. Количественная интерпретация данных ВЭЗ и ЭП осуществляется с помощью теоретически рассчитанных палеток, эмпирических зависимостей и корреляционных связей между измеряемыми геофизическими и определяемыми гидрогеологическими параметрами и другими способами.

Основными гидрогеологическими задачами, при решении которых эффективно использование ВЭЗ и ЭП, являются: 1) изучение глубины залегания кровли опорного электрического горизонта, который на разных участках может быть представлен водоупорными или хорошо фильтрующими образованиями – кристаллическими породами фундамента, дочетвертичными породами, перекрытыми чехлом наносов и т. п.; 2) определение глубины залегания и мощности горизонтов различных горных пород, слагающих геологический разрез, в том числе водоносных и водоупорных; 3) картирование и изучение тектонических нарушений и обводненных зон повышенной трещиноватости; 4) изучение литологических особенностей горных пород разреза; 5) определение минерализации подземных вод и засоленности почв и пород; 6) выделение участков, однородных по геологическому строению (районирование по удельному сопротивлению горных пород); 7) выявление водоупорных или, наоборот, хорошо фильтрующих горизонтов горных пород среди покровных образований; 8) определение глубины распространения открытой трещиноватости пород и мощности коры выветривания и др.

Метод вызванной поляризации (ВП) целесообразно использовать для решения следующих задач: 1) изучение глубины залегания и мощности водоносных и водоупорных горизонтов; 2) оценка общей минерализации подземных вод и засоленности пород зоны аэрации; 3) изучение проницаемости первого от поверхности водоносного горизонта и обоснования экстраполяции данных опытно-фильтрационных работ; 4) определение литологических особенностей пород и диалогического расчленения разреза песчано-глинистых отложений, особенно в условиях распространения пестрой минерализации подземных вод. Возможности использования метода ВП для решения гидрогеологических задач в процессе поисково-съемочных и разведочных работ существенно расширяются при комплексировании его с другими видами геофизических исследований. Глубинность исследований методом ВП не превышает 100 м.

Из других методов электроразведки, применяемых при гидрогеологических исследованиях, следует отметить метод естественного электрического поля (определение мест поглощения и выхода воды на дне водоемов, областей инфильтрации атмосферных осадков и разгрузки подземных вод в рыхлых отложениях, таликов, направления и скорости движения подземных вод), метод заряженного тела (определение направления и скорости движения подземных вод), метод частотного электромагнитного зондирования (ЧЭМЗ) и радиокомпараторный метод.

Тесная связь сейсмических (упругих и поглощающих) свойств горных пород с их физико-механическими и водно-физическими свойствами предопределяет

большие возможности и перспективы использования методов сейсморазведки, основанных на теории распространения упругих колебаний в различной геологической среде. Эти методы дают наиболее точные данные о положении границ пород различного состава и поэтому находят особенно широкое применение при изучении структурных особенностей территорий, расчленении разреза, выявлении зон тектонических нарушений и трещиноватости, определении глубин залегания грунтовых вод, мерзлых пород и физико-механических свойств горных пород. Ведущим методом сейсморазведки при решении гидрогеологических задач является корреляционный метод преломленных волн (КМПВ).

Гравиразведка, основанная на изучении естественного поля силы тяжести, позволяет судить о распределении в земной коре масс различной плотности и, следовательно, о геолого-тектоническом строении изучаемой площади. В соответствии с этим гравиразведка широко применяется при тектоническом районировании, при решении структурно-геологических задач и при поисково-разведочных работах на различные полезные ископаемые.

В гидрогеологии гравиразведка может использоваться при решении следующих задач: 1) гидрогеологическое районирование территорий и картирование складчатых структур; 2) изучение литолого-петрографического состава и плотности пород разреза; 3) изучение морфологии кровли кристаллических пород фундаментов, являющихся основанием для артезианских бассейнов, и глубины ее залегания; 4) выявление карста, погребенных речных долин и зон повышенной трещиноватости; 5) изучение структурных особенностей площадей, сложенных карбонатными и другими образованиями.

Магниторазведка основана на изучении особенностей геомагнитного поля, обусловленных неодинаковой намагниченностью горных пород. Применение магниторазведки в гидрогеологических целях основано на том обстоятельстве, что многие горные породы, характеризующиеся хорошими водными свойствами, обладают очень низкими магнитными свойствами. Это прежде всего породы осадочного комплекса — пески, песчаники, известняки, доломиты и др., которые по магнитной восприимчивости заметно отличаются от изверженных образований.

Магниторазведка обычно применяется для решения следующих задач: 1) изучение геолого-тектонического строения районов, закрытых молодыми осадочными отложениями; 2) определение мощности отложений платформенного чехла и глубины залегания кристаллического фундамента; 3) изучение состава пород фундамента; 4) выявление тектонических нарушений, сбросов, даек, жил и других структурных элементов; 5) изучение основных направлений трещиноватости и карстовых проявлений.

Создание высокочувствительных протонных и квантовых магнитометров создает возможности использования магниторазведки при проведении крупномасштабных съемочных работ и при разведке месторождений подземных вод.

В процессе гидрогеологических и геофизических работ часто находит применение радиометрия. Радиометрические методы разведки не относятся к геофизическим методам в собственном смысле этого слова, но часто сопровождают их, облегчая решение поставленных задач.

Фиксируя ореолы рассеяния радиоактивных элементов, содержащихся в горных породах, радиометрические методы разведки (гамма-съемка и эманационная съемка) помогают трассировать тектонические нарушения под чехлом рыхлых образований, прослеживать границы распространения горных пород различного литолого-петрографического состава, определять величину радиоактивности подземных вод, следить за направлением и скоростью их перемещения.

В последние годы интенсивно развивается новое научное направление, связанное с применением ядерных излучений для изучения водных и физических свойств горных пород (особенно осадочных), которое получило название ядерной геофизики. Наиболее разработанной пока является та область ядерной геофизики, которая относится к исследованию горных выработок (радиоиндикаторные и изотопные методы исследований), однако перспективы применения методов ядерной геофизики в гидрогеологии благоприятны.

Все большую роль, особенно в процессе гидрогеологических исследований, приобретают геотермические измерения с дневной поверхности и в скважинах, основанные на изучении аномалий теплового поля Земли. В процессе работ обычно измеряют геотермический градиент, величина которого меняется обратно пропорционально теплопроводности горных пород, а последняя, как правило, возрастает с увеличением плотности и уменьшением пористости пород. Геотермические измерения дают информацию о тепловом потоке, а также о породах и структурах, сквозь которые проходит этот тепловой поток.

Подземный водообмен оказывает чрезвычайно сильное влияние на тепловое поле земной коры. Это позволяет использовать геотермические измерения для изучения динамики и направления движения подземных вод. Очень часто задачей геотермических исследований является разведка термальных вод, в процессе которой определяют пути подъема термальных вод, направление движения воды и ее подземные «резервуары». Эти исследования проводят также с целью картирования водоносных тектонических нарушений, изучения процессов карстообразования и решения некоторых других вопросов.

Геофизические исследования в скважинах. Скважинные методы геофизических исследований (каротаж) являются обязательной составной частью гидрогеологических исследований и должны проводиться во всех скважинах. Они основаны на изучении тех же физических полей, что и наземные геофизические методы, с учетом влияния различных искусственных процессов и факторов, которые имеют место или могут быть вызваны при бурении скважин (взаимодействие бурового раствора с породами и подземными водами, гидравлическое возбуждение пласта, индикация подземных вод и т. п.). Каротаж проводят обычно в не обсаженных, заполненных глинистым раствором или чистой водой скважинах (реже в сухих и обсаженных скважинах).

Наибольшее применение в практике исследований гидрогеологических скважин имеют методы электрокаротажа (метод кажущегося сопротивления — КС, естественных потенциалов — ПС, боковых каротажных зондирований — БКЗ, резистивиметрия — РК), радиоактивного каротажа (гамма-каротаж — ГК, нейтронный гамма-каротаж — НГК, каротаж по методу изотопов — МИ, гамма-гамма-каротаж — ГГК), расходометрического, акустического — АК и термометрического каротажей. Реже пока применяются магнитный каротаж (МК) и волновой электромагнитный каротаж (ВЭМК).

Применение указанного комплекса каротажных работ обеспечивает решение широкого круга вопросов, в том числе: 1) изучение геологического строения разрезов и детальное расчленение по литологическим особенностям пород; 2) выделение водоносных и водоупорных пластов и зон с определением их мощности; 3) оценка емкостных и фильтрационных свойств водоносных пород (пористости, пустотности, влажности, коэффициентов фильтрации и водопроводимости, статических напоров, скоростей фильтрации, действительных скоростей движения подземных вод); 4) изучение степени взаимосвязи водоносных пластов и зон; 5) оценка общей минерализации и температуры подземных вод.

Помимо этого комплекс каротажных работ проводится для оценки и контроля технического состояния гидрогеологических скважин и их соответствующей технологической подготовки (резистивиметрия, расходометрия, кавернометрия, гамма-каротаж, инклинометрия, фотокаротаж, дефектометрия, прострелочные работы и торпедирование), а результаты каротажа используются при интерпретации результатов наземных геофизических исследований.

Не следует думать, что применение одного из видов каротажа может обеспечить решение той или иной гидрогеологической задачи, даже если этот метод каротажа обладает большой разрешающей способностью. Сложные природные условия вместе с комплексом факторов искусственного характера во

многих скважинах затрудняют получение однозначного ответа, и поэтому требуется применение комплекса геофизических методов, проведения в больших объемах параметрических геофизических наблюдений и установления соответствующих коррелятивных связей, обязательного прохождения контрольных буровых скважин для повышения надежности и контроля результатов геофизических работ.

Тем не менее геофизические исследования скважин следует рассматривать как важный, необходимый и достаточно эффективный комплекс работ, и прежде всего в части их геолого-гидрогеологической документации и опробования. Во многих скважинах применение рационального для рассматриваемых условий комплекса геофизических методов позволяет переложить основную тяжесть по геологической и в значительной мере по гидрогеологической документации их разреза на каротажные работы и проходить скважины сплошным забоем с минимальным объемом отбора керна и оптимальным объемом опытно-фильтрационных работ.

Ниже кратко излагаются лишь некоторые вопросы рационального комплексирования геофизических методов при решении основных гидрогеологических задач в результате бурения и опробования скважин.

Изучение геологического строения разрезов и их расчленение по литологическим особенностям осуществляется путем использования типовых геолого-каротажных разрезов, предварительно составленных на основе совместного анализа каротажных диаграмм и керна. Наиболее рациональным для этой цели является сочетание комплекса методов кажущегося сопротивления (КС), естественных и вызванных потенциалов (ПС и ВП), естественной гамма-активности (ГК). Дополнительно привлекаются методы гамма-гамма-каротажа (ГГК) и нейтронного гамма-каротажа (НГК), особенно при изучении разрезов скальных пород. Вспомогательными, но весьма перспективными оказываются также методы микрозондирования и повторных ПС (при изучении рыхло сцементированных разрезов).

Выявление обводненных и проницаемых пластов и зон с определением их эффективной мощности осуществляется различными комплексами методов в зависимости от состояния скважины и призабойной зоны. При бурении скважин с глинистым раствором используются методы, основанные на изучении результатов гидравлического и электрохимического взаимодействия бурового раствора с проницаемыми участками разреза. Это прежде всего метод электрокаротажа с двумя зондами, микрозондирование, различные модификации радиоактивного каротажа и метод повторного измерения ПС. Для примера на рисунке 6.1 показана схема выделения водоносного

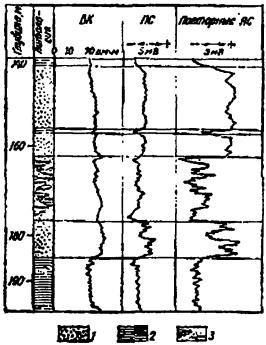


Рис. 6.1. Выделение водоносных пластов по данным метода повторных ПС: 1 — песок; 2 — глины; 3 — чередование песчаных и глинистых отложений

пласта в условиях сложного разреза, когда применение традиционных методов гидрогеологического расчленения разреза методами сопротивлений и ПС не дало положительных результатов, а повторное измерение ПС после засоления бурового раствора оказалось более эффективным.

Выделение проницаемых пластов по данным измерения естественных потенциалов (ПС) основано на измерении диффузионно-адсорбционной ЭДС, возникающей при наличии разности сопротивлений бурового раствора и пластовых вод (проницаемые песчаные пласты характеризуются меньшими ЭДС по сравнению с глинистыми слоями, и их можно выделять по диаграммам ПС). В рассматриваемом примере существенная разница в сопротивлениях бурового раствора и подземных вод песчаного пласта возникла лишь при подсолении первого, что и позволило уверенно выделить водоносный пласт по результатам повторного замера ПС.

Оценка емкостных и фильтрационных свойств водоносных пород — наиболее сложная задача. В настоящее время в нефтепромысловой и гидрогеологической практике в той или иной мере опробовано несколько десятков геофизических методов определения емкостных и коллекторских свойств пород. Подавляющее большинство из них относится к категории эмпирических, т. е. основанных на установлении корреляционных зависимостей между некоторыми геофизическими показателями (удельным электрическим сопротивлением, естественной и вызванной радиоактивностью и др.) и гидрогеологическими параметрами (общей и эффективной пористостью, трещиноватостью, коэффициентом и скоростью фильтрации), и справедливыми оказываются только для районов, в которых эти связи установлены. Наибольшее практическое применение эти способы находят при опробовании скважин, проходимых с глинистым раствором (электрокаротаж, микрозондирование, ПС, радиоактивный и акустический каротажи). Для определения направления и скорости

движения подземных вод используются метод заряженного тела (при неглубоком залегании пресных вод), а также индикаторные методы, основанные на инъекции индикаторов и прослеживании различными способами направления и скорости их перемещения между скважинами или в окрестности ствола одной скважины.

Для оценки фильтрационных свойств обводненных пород устойчивых разрезов, при бурении которых используется чистая вода или гарантируется качественная разглинизация, перспективны методы резистивиметрии и расходометрии, имеющие теоретическое обоснование и не требующие выявления корреляционных зависимостей.

Метод резистивиметрии для послойной оценки фильтрационных свойств водоносных отложений имеет широкое практическое применение. Определение параметров основано на использовании зависимости скорости разбавления (опреснения) электролита, введенного в скважину, от фильтрационных свойств пород, а проводится по формуле:

$$v=\frac{3{,}62r_c}{a(t_2-t_1)}\lg\left(\frac{C_1-C_0}{C_2-C_0}\right), \qquad (6.1)$$

где v — средняя скорость фильтрации; a — коэффициент, зависящий от характера стенок скважины и скважности фильтра (обычно $0{,}5 \le a \le 2$, для совершенных чистых скважин $a = 2$); C_0 — концентрация индикатора (*соль NaCl* или NH_4Cl) в пластовой воде до его запуска; C_1 и C_2 — соответственно концентрация индикатора на время t_1 и t_2 от начала его запуска (оценивается по удельному электрическому сопротивлению).

Определяя скорость фильтрации по зависимости (6.1) и зная гидравлический уклон потока I, можно определить коэффициент фильтрации $K = v/I$. Приемлемые результаты получают при исследовании скважин, вскрывающих песчаные и гравийно-галечные коллекторы, существенно завышенные значения скоростей и коэффициентов фильтрации — при опробовании трещиноватых и закарстованных пород.

При послойном определении коэффициента фильтрации устанавливают величины поглощения воды каждым слоем Q_i при стабильном ее наливе (откачке) в скважину и повышении уровня на величину S_c и определяют соответственно коэффициенты фильтрации K_i или водопроводимости $T_i = K_i m_i$ из соотношения:

$$S_c=\frac{Q_i}{2\pi K_i m_i}\ln\left(\frac{R}{r_c}\right)=\beta\left(\frac{Q_i}{K_i m_i}\right), \qquad (6.2)$$

где $\beta = 1/2plnR/r_c$ — коэффициент, величина которого при реальных значениях параметров изменяется от 1,3 до 1,5 для напорных вод и от 0,9 до 1,2 для грунтовых вод и нередко при ориентировочных расчетах принимается равной единице.

В благоприятных условиях по данным резистивиметрии обеспечивается послойное определение коэффициента фильтрации с погрешностью 15–25%. Детально методика обработки резистивиметрических кривых приведена в методическом руководстве.

Следует отметить, что резистивиметрию нельзя использовать для оценки фильтрационных свойств в условиях взаимосвязи нескольких водоносных горизонтов, различающихся по напорам. В таких условиях целесообразнее применять расходометрию.

Метод расходометрии обладает более широкими возможностями определения фильтрационных свойств и гидростатических напоров водоносных горизонтов, в том числе в условиях их гидравлической взаимосвязи. Обработка данных расходометрии позволяет выделить в разрезе и определить мощности всех водоносных зон и соответствующие им статические уровни, построить вертикальный профиль водопроницаемости по разрезу скважины и оценить среднее значение коэффициента фильтрации по зонам.

Термометрический метод основан на измерении температур в искусственно подогретых с помощью электронагревателей скважинах. Участки наибольшего изменения температуры указывают положение зон водопритоков (остывание вследствие теплопереноса движущейся жидкостью). Скорость фильтрации определяется, как и при резистивиметрическом методе, по формуле (6.1), в которой вместо концентраций индикатора C_0, C_1 и C_2 принимаются соответствующие значения температур t_0^0, t_1^0 и t_2^0 (исходная до подогрева и фиксируемые в моменты времени t_1 и t_2 после подогрева).

Изучение степени взаимосвязи водоносных зон и горизонтов осуществляется по данным расходометрических работ, выполняемых при откачке по наблюдательной скважине, вскрывающей тот же разрез, что и опытная скважина. Интенсивность откачки из опытной скважины должна быть достаточной для того, чтобы вызвать ощутимые для замеров расходометрией перетоки воды в зоне расположения наблюдательной скважины.

Определение общей минерализации подземных вод осуществляется несколькими методами, физической основой которых является использование зависимости электрического сопротивления и амплитуды естественных потенциалов от минерализации изучаемых вод. Обычно для этой цели используются данные стандартного каротажа КС и БКЗ, по замерам которых определя-

ется минерализация воды с точностью до 25%. Величину минерализации можно также установить методом повторных (после подсоления) замеров естественного потенциала (ПС) и микрозондированием. Если к оценке минерализации подземных вод предъявляются повышенные требования, целесообразно использовать указанные выше методы в комплексе. Это может снизить погрешность определения до 10–15%.

Анализ опыта применения геофизических методов при гидрогеологическом изучении месторождений подземных вод указывает на возможность существенного повышения геолого-экономической эффективности выполняемых исследований. В частности, на стадии предварительной разведки применение геофизических методов исследований способствует эффективному решению таких вопросов, как: 1) выделение в пределах месторождения наиболее перспективных эксплуатационных участков либо участков, благоприятных для размещения проектируемых сооружений; 2) выбор направлений разведочных профилей и обоснование схемы размещения сети разведочных скважин; 3) определение оптимальной глубины изучения месторождения; 4) количественная и качественная оценка изучаемых водоносных горизонтов; 5) выявление и оценка границ месторождения, степени водообмена подземных вод и условий возобновления их запасов.

Для решения этих вопросов, а также многих других частных задач, о которых говорилось выше, проводятся площадные геофизические исследования и комплекс исследований на скважинах. Получаемые в результате каротажных и опытно-фильтрационных работ на скважинах данные о геолого-литологическом разрезе и гидрогеологических его характеристиках экстраполируются на всю изучаемую площадь на основе результатов наземных геофизических исследований. Эти данные используются для обоснования схемы дальнейшей разведки месторождения.

На стадии детальной разведки преобладающее значение имеют геофизические исследования в скважинах, способствующие геолого-литологическому расчленению изучаемого разреза, его гидрогеологической стратификации, изучению и оценке фильтрационных свойств пород, уточнению положения границ участка и месторождения, их характера и граничных условий, а также решению других гидрогеологических задач.

Геофизические исследования на каждой из стадий разведки месторождения выполняются поэтапно (на первом этапе — работы, предшествующие основным гидрогеологическим исследованиям, на втором — выполняемые одновременно с гидрогеологическими исследованиями). Это обеспечивает бо-

лее целенаправленное и обоснованное по объемам проведение гидрогеологических исследований.

В результате геофизических работ каждого этапа составляются схематические карты и разрезы, отражающие результаты выполненных в соответствии с геологическим заданием исследований (схемы геолого-тектонического строения; схематические карты мощностей зоны аэрации или рыхлых отложений; карты литологических особенностей, коэффициентов фильтрации, минерализации подземных вод и т. п.). Эти материалы являются основой для корректировки направленности, видов и объемов дальнейших гидрогеологических работ.

Глава 6.2. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К ядерно-физическим методам исследований здесь условно относятся все методы, основанные на выявлении и использовании закономерностей распространения и поведения искусственных и естественных стабильных и радиоактивных изотопов в природных водах в целях решения самых разнообразных гидрогеологических задач. Эти методы получили интенсивное развитие в последние годы и начинают достаточно широко использоваться для решения частных гидрогеологических задач (изучение происхождения, распределения и возраста подземных вод, интенсивности изменения влажности пород в зоне аэрации и движения подземных вод в зоне насыщения, определение водно-физических и фильтрационных характеристик горных пород, оценка взаимосвязи различных типов природных вод и т. п.).

Ядерно-физические методы используют в своей основе прежде всего природные стабильные и радиоактивные изотопы, особенности естественного распространения которых могут быть использованы и при гидрогеологических исследованиях. К числу таких природных изотопов относятся стабильные изотопы водорода и кислорода (Д и ^{18}O), входящие в состав воды и образующиеся под действием космических лучей, углерод ^{14}C, тритий Т, кремний $^{32}S_i$, гелий ^{3}He и изотопы семейства урана и тория (^{222}Rn, ^{226}Ra и др.).

Основными тяжелыми соединениями стабильных изотопов кислорода и водорода являются НД^{16}O и $H_2{}^{18}O$, которые присутствуют в природных водах в количестве 320 и 2 000 на миллион молекул (соответственно на долю обыкновенных молекул воды H_2O приходится 997 680 частей).

Изучая изотопный состав атмосферных осадков, морских и подземных вод и анализируя причины возможного его изменения, можно более обоснованно решать вопросы происхождения вод изучаемого объекта.

Определяя содержание в воде различных природных радиоактивных изотопов, являющихся продуктами радиоактивного распада исходных изотопов, и анализируя закономерности такого распада и возможные пути обогащения подземных вод данными изотопами, устанавливают возраст подземных вод. Для этой цели используют данные как о содержании отдельных радиоактивных изотопов (например, трития, ^{14}C, ^{32}Si), так и их соотношений (радия и радона, гелия и аргона и др.).

Выявленные закономерности содержания и соотношения природных радиоактивных изотопов в различных типах природных вод (в осадках, реках, морях, озерах, подземных водах и т. д.) и анализ причин возможных изменений дают возможность решать самые разнообразные гидрогеологические

задачи, начиная от выявления генезиса тех или иных природных вод и кончая обоснованием путей наиболее рационального изучения, оценки и использования их в народном хозяйстве.

Ядерные и изотопные методы исследований широко используют и искусственные радиоизотопы, получаемые путем бомбардировки стабильных элементов ядерными частицами (например нейтронами в ядерном реакторе). Различные виды излучений, испускаемых радиоизотопами, дают возможность метить ими водные и другие объекты, прослеживать за их миграцией и, таким образом, использовать искусственные радиоизотопы в качестве радиоактивных индикаторов. Применение радиоактивных изотопов при исследованиях движения подземных вод является, по существу, логическим развитием известного метода индикаторов. К числу преимуществ методов меченых атомов относятся: высокая чувствительность обнаружения индикаторов при низких их концентрациях, большой выбор изотопов для индикации и техническая возможность «мечения» больших объемов воды. Из недостатков радиоиндикаторных методов следует отметить: сравнительно высокую их стоимость, потребность в специализированном полевом оборудовании и специальном обучении сотрудников, выполняющих работу с радиоактивными веществами.

В каждом конкретном случае радиоиндикатор выбирается с учетом условий проведения эксперимента, индикационных свойств изотопа (энергии излучения, периода полураспада, сорбционных и растворительных свойств) и его стоимости. В качестве наиболее распространенных в мировой практике индикаторов используются изотопы: ^{3}H, ^{131}I ^{51}Cr, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{24}Na, ^{35}S, ^{82}Br, ^{3}He и др. На стадии планирования экспериментов необходимо получить разрешение от органов здравоохранения. В любом случае использование радиоактивных изотопных индикаторов должно быть обосновано научным или экономическим преимуществом или большей точностью ожидаемых результатов по сравнению с обычно практикуемыми методами.

Сущность радиоиндикаторных методов применительно к определению направления и скорости фильтрации подземных вод была изложена ранее. Однако диапазон практического применения радиоиндикаторных методов при гидрогеологических исследованиях является существенно более широким. Они могут с успехом использоваться при изучении геометрии порового пространства, процессов влагопереноса в насыщенных и неполностью насыщенных горных породах (капиллярное, инфильтрационное и фильтрационное движение), физической картины движения в пористых и трещиноватых средах, условий перемещения растворов, загрязнений и других веществ в различной природной обстановке, процессов осушения или увлажнения при дей-

ствии различных инженерных сооружений, для определения влажности, пористости, водопроводимости и других параметров, выявления и оценки роли тектонических разломов и других границ области фильтрации, областей питания и разгрузки подземных вод, степени их взаимосвязи с поверхностными водами, условий фильтрации воды из каналов и водохранилищ и т. д.

К ядерно-физическим методам исследований относится также группа методов, основанных на применении для изучения водных и других объектов герметизированных радиоактивных источников. В эту группу, в частности, входят и широко практикуемые в геофизике методы радиоактивного каротажа, основанные на измерении различного рода излучений в разрезах скважин под воздействием источника радиоактивного излучения, размещаемого в каротажном зонде. К ним относятся гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж и нейтронный гамма-каротаж. Эти методы оказываются эффективными при литологическом и гидрогеологическом расчленении изучаемого разреза скважин любой глубины. Следует особо отметить высокую эффективность геолого-гидрогеологического изучения разреза рыхлых отложений с помощью радиоактивного каротажа, выполняемого пенетрационно-каротажным методом, при котором каротажный зонд задавливается в рыхлые отложения с помощью специальной гидравлической установки, смонтированной на автомобиле. Этим методом обеспечивается скоростное геолого-гидрогеологическое изучение толщи рыхлых отложений зоны аэрации и зоны насыщения на глубину до 40 м.

Глава 6.3. МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ

Геофизические исследования выполняются при проведении средне- и крупномасштабной инженерно-геологических съемок, а также при детальных работах, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией различных сооружений. Они позволяют повышать детальность и точность изысканий, уменьшать затраты времени и средств на проведение инженерно-геологических работ

Объектом исследований обычно является верхняя часть разреза (ВЧР), характеризующаяся значительной неоднородностью, изменчивостью литологического состава, строения и физических свойств горных пород. Эффективность геофизических исследований при изучении этого сложного объекта достигается применением методов различной физической природы, с повышенной детальностью наблюдений, получением интегральных характеристик, отражающих особенности строения и свойств массива пород в его естественном залегании, возможностью многократных повторных наблюдений без нарушения строения и состояния геологической среды. Последнее обстоятельство позволяет осуществлять режимные геофизические наблюдения за интенсивностью геологических процессов, происходящих под воздействием естественных и техногенных факторов.

Инженерно-геологические, геофизические исследования выполняют на земной поверхности, в скважинах и горных выработках. Используют также аэрокосмические и аэрогеофизические материалы. Ведущими методами являются сейсмические: метод преломленных волн (МПВ), реже — отраженных волн (МОВ), а также один-два из следующих: электропрофилирование методами естественного поля (ЕП), кажущихся сопротивлении, радиоволновым (РВП), вертикальные электрические зондирования методом сопротивлений или вызванной поляризации (ВЭЗ или ВЭЗ-ВП), частотные зондирования (ЧЗ), зондирования становлением поля (ЗС) и радиоволновые (РВЗ), гравимагнитные, ядерные и скважинные методы.

Инженерно-геологические съемки бывают средне-, крупномасштабными и детальными.

При среднемасштабных съемках (1:200 000 – 1:100 000) используют данные одного-трех наиболее производительных геофизических методов профилирования (космические и воздушные, включая радиотепловые (РТС) или инфракрасные (ИКС) и магнитные съемки) и намечают детализационные или ключевые участки. В пределах этих участков работы проводят по более густой сети наблюдений и более широким комплексом полевых геофизических

методов. Работы проводят одновременно с бурением скважин, инженерно-геологическими и фильтрационными исследованиями, отбором образцов пород для лабораторных исследований и выполнением ГИС. Число пунктов геолого-гидрогеологических исследований может быть в два и более раза меньше, чем без применения геофизики.

Крупномасштабное картирование (1:25 000 – 1:10 000) проводят, как правило, без использования ключевых участков, а в виде сплошной съемки. Применяют комплекс геофизических методов, включающий преимущественно сейсморазведку МПВ и электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ЗСБ, РВЗ), а при наличии скважин выполняют сейсмоакустические и электрические исследования в них.

Изучение условий строительства инженерных сооружений. Расчленение поверхностных и коренных отложений и изучение оснований проектируемых наземных и подземных инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) проводят для оценки несущей способности и устойчивости массивов горных пород на конкретных строительных площадках. Эти работы характеризуются большой детальностью (масштаб исследований от 1:10 000 до 1:1 000).

Геофизические методы используют для картирования рыхлых отложений и определения глубины залегания коренных скальных пород, детального расчленения верхней части разреза, оценки физико-механических и водно-физических свойств пород в их естественном залегании, изучения трещиноватости и нарушенности массива, определения уровня грунтовых вод и их динамики. В задачи геофизических методов входит также изучение напряженного состояния коренных пород, выявление геодинамических явлений и сейсмичности (карст, суффозия, оползни, обвалы, просадки и др.), представляющих опасность для будущего строительства, проведение мониторинга за работой ответственных сооружений и изучение их влияния на геологическую среду.

Для этого применяют комплекс методов, состав которого в значительной степени аналогичен используемому на ключевых участках, но ведущими в комплексе являются сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а также электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП или ЗСБ), которые дополняются, по возможности, микромагнитной, эманационной, гамма-съемками. Применяют также сейсмоакустическое и электромагнитное межскважинные просвечивания. В качестве примера на рисунке 6.2 приведены результаты комплексных геофизических исследований для изучения рыхлых и скальных пород.

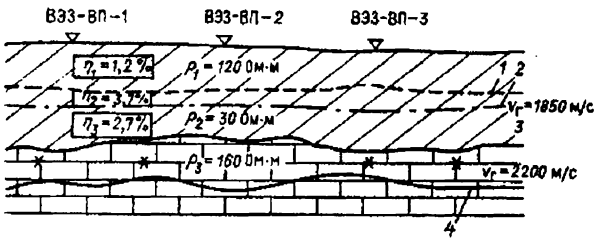


Рис. 6.2. Пример определения условий залегания скальных пород под рыхлыми образованиями по данным методов ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ: 1 — уровень капиллярного поднятия по данным ВЭЗ-ВП; 2 — поверхность грунтовых вод по данным ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ; 3 и 4 — кровля скальных пород по данным ВЭЗ, сохранных пород по данным МПВ ($V_г$ — граничная скорость) *(Геофизические методы..., 1988)*

Глава 6.4. МЕТОД ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Метод преломленных волн может быть использован только для изучения слоев, в которых скорость распространения упругих волн больше, чем в вышележащих. В геологических разрезах разных районов выделяют до семи таких границ. Даже при небольшой мощности преломляющих слоев на них могут образовываться достаточно интенсивные волны. В этом случае проходящая волна, которая образует преломленную волну, распространяется в таком тонком слое вдоль преломляющей границы с граничной скоростью $v_г$. Следовательно, величина граничной скорости характеризует слой небольшой мощности. Для каждой наблюдаемой преломленной волны может быть построен годограф. Совокупность годографов, полученных при взрыве в одном пункте, называют серией годографов предвиденных волн. Годографы преломленных волн пересекаются между собой, что создает определенные затруднения при их прослеживании.

Метод преломленных волн наряду с решением структурных задач позволяет прослеживать неглубоко залегающие границы раздела, от которых не удается зарегистрировать отраженные волны, обнаруживать и трассировать дизъюнктивные нарушения, изучать сводовые части поднятий, проводить стратификацию сейсмических горизонтов (по значениям и характеру изменения граничных скоростей). Метод преломленных волн широко применяют также при региональных сейсмических исследованиях по картированию поверхности кристаллического фундамента и при изучении земной коры (глубинные сейсмические зондирования).

Метод преломленных волн совместно с МОВ используют главным образом при решении различных задач структурной геологии, т. е. при поисках и разведке полезных ископаемых, месторождения которых связаны с определенными структурными особенностями, например нефти, газа, угля, каменной соли. Большое значение приобретает применение МПВ и МОВ в инженерной геологии при исследовании верхних частей разреза, определении положения поверхности плотных пород и т. п. В последние годы эти методы привлекают к решению отдельных частных задач рудной геологии.

В связи с различными возможностями основных методов сейсморазведки в отношении глубины исследования, определения средних и граничных скоростей, изучения тектонических нарушений и т. п. целесообразно применять их совместно. Правильное комплексирование этих методов между собой и с другими геологическими и геофизическими методами повышает эффективность разведки.

Так как вблизи пункта возбуждения головные преломленные волны отсутствуют, то система наблюдений МПВ должна строиться так, чтобы ближайший к пункту взрыва сейсмоприемник был установлен на некотором расстоянии, сравнимом с предполагаемой глубиной залегания преломляющей границы. Уверенная интерпретация данных МПВ возможна лишь тогда, когда по линии профиля можно построить по крайней мере два годографа, полученных из разных пунктов возбуждения (ПВ). Поэтому система наблюдения строится так, чтобы можно было построить встречные, когда годографы получаются в интервале между двумя ПВ, или нагоняющие годографы, когда они строятся из последовательно расположенных ПВ. Нагоняющие годографы от одной и той же плоской границы параллельны, поэтому по ним можно строить сводные годографы путем параллельных смещений частных годографов.

Обычно применяются полные корреляционные системы наблюдений, обеспечивающие непрерывное прослеживание преломленных волн вдоль профиля наблюдений. В методе МПВ используются системы непрерывного профилирования: через один, два или три интервала.

В простых геологических условиях выбираются неполные системы наблюдений, когда волны от одной границы выделяются не путем непрерывной корреляции, а путем выявления преломляющих границ на отдельных участках изучаемых профилей. Неполные системы применяются при постановке сейсмических зондирований.

Расстояние между приемниками в МПВ меняется от 10 до 100 м, а при детальных инженерно-геологических исследованиях — от 1–2 до 5–10 м. Преломленные волны отличаются пониженным спектром частот, так как из-за большого удаления от ПВ волны высоких частот поглощаются. Поэтому, работая на низкочастотных фильтрациях, можно избавиться от отраженных, прямых и других волн.

Глава 6.5. СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Акустический метод основан на использовании колебаний звуковой и ультразвуковой частот. Относительно высокие частоты акустических колебаний являются причиной их быстрого затухания с расстоянием, из-за чего область применения таких частот в сейсморазведке ограниченна. В то же время это обстоятельство позволяет добиться высокой разрешающей способности при наблюдениях. Метод применяют при непрерывном сейсмокаротаже скважин и при морских исследованиях. Звуковые колебания, периодически возбуждаемые в узкой полосе частот в виде импульсов равной продолжительности с частотой несколько тысяч герц, при их правильной синусоидальной форме и частой повторяемости импульсов (10 имп/с) обеспечивают высокую разрешающую способность метода.

Акустическим методом изучается монолитность пород, что важно при проектировании сооружений. Это осуществляется либо акустическим просвечиванием пород, либо исследованием отражения звуков от пустот в монолитах (рис. 6.3). В первом случае в одну скважину помещают датчик колебаний, во вторую — приемник, причем для надежности контакта датчика и приемника с породами обе скважины заполняют водой. Во втором — по наличию акустической тени, т. е. по уменьшению амплитуды принимаемого сигнала, судят о наличии пустоты в породах. Величина амплитуды отраженного звука от пустот и трещин иная, чем от монолита. Этот способ предполагает помещение как датчика колебаний, так и приемника в одну залитую водой скважину.

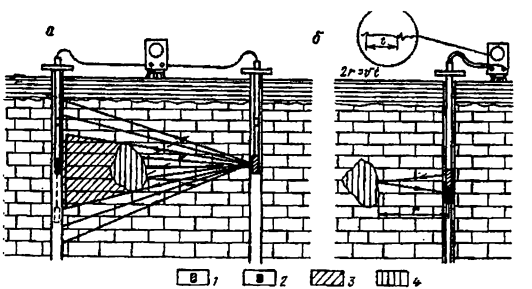


Рис. 6.3. Акустические методы просвечивания — теневой (*а*) и отражения (*б*) — для изучения скальных пород: 1 — датчик; 2 — приемник; 3 — акустическая тень; 4 — пустота в породе

Глава 6.6. СТАЦИОНАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Назначение режимных стационарных наблюдений при инженерных изысканиях и их состав

Для геологического обоснования проектов сооружений и инженерных работ требуется полная характеристика инженерно-геологических условий территории или строительной площадки, причем не только их фактического состояния, но и динамики развития, т. е. изменений отдельных элементов этих условий во времени. Например, необходимо представлять, как изменяются уровни воды в реке, озере, водохранилище, уровни подземных вод и связанные с ними явления затопления и подтопления территорий, как изменяются характер и скорость развития геологических процессов, осадки и деформации сооружений и другие явления. Все такие качественные и количественные изменения инженерно-геологических условий территорий в целом или отдельных элементов этих условий во времени характеризуют их динамику. Динамика процессов и явлений может иметь определенный режим, когда их изменения закономерны во времени и обусловлены, например, климатическими, гидрологическими или в целом физико-географическими условиями.

Наблюдения за динамикой процессов и явлений на наблюдательных стационарах — участках, точках, пунктах — с целью выявления их закономерностей и обусловленности составляют определенный, очень важный вид геологических работ, называемый режимными стационарными наблюдениями. Эти наблюдения необходимы также для того, чтобы получать возможность предвидеть (прогнозировать) тенденцию и масштаб развития тех или иных процессов и явлений под влиянием естественных или искусственных условий.

Наблюдения за развитием процессов и явлений во времени при инженерных изысканиях обычно выполняют с целью:

1) получения их качественных и количественных характеристик и оценок;
2) установления закономерностей развития процессов и явлений и выявления причин, их обусловливающих;
3) предупреждения опасных и катастрофических проявлений процессов;
4) составления прогноза развития процессов и опасных явлений;
5) обоснования необходимых мероприятий по охране геологической среды, жизни и деятельности людей, обеспечению устойчивости сооружений, управлению геологическими процессами и явлениями в нужном

для человека направлении. Таково главное назначение режимных стационарных наблюдений. Они имеют очень важное значение, так как во многих случаях только в результате их выполнения можно установить причины, условия и закономерности развития неблагоприятных или опасных процессов и явлений и обосновать пути и средства управления ими.

При проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений и хозяйственном использовании территорий чаще всего приходится выполнять следующие виды режимных стационарных наблюдений:

а) метеорологические и гидрологические;
б) гидрогеологические;
в) геотермические;
г) за деформациями масс горных пород на склонах, в откосах, на оползневых участках, в подземных выработках и котлованах;
д) за осадками и деформациями сооружений;
е) за скоростью и характером развития процессов выветривания, эрозии, абразии, пучения горных пород, за их физическим состоянием и другими процессами и явлениями.

Роль режимных стационарных наблюдений на разных стадиях инженерных изысканий неодинакова. Как видно на рисунке 1–6 (см. гл. I), основной их объем обычно производят на стадии детальных исследований. Они дополняют другие виды геологических работ и поэтому обеспечивают полное и детальное изучение инженерно-геологических условий при решении тех или иных инженерных задач. В небольшом объеме эти наблюдения иногда выполняют на стадиях предварительных и рекогносцировочных исследований, когда без материалов стационарных режимных наблюдений невозможно решить поставленные задачи. Их выполняют также при дополнительных изысканиях для обоснования рабочих чертежей и очень часто — в период эксплуатации сооружений и территорий, в отличие от других видов геологических работ. В этом последнем состоит одна из характерных особенностей режимных стационарных наблюдений.

Гидрорежимные наблюдения. Метеорологические и гидрологические наблюдения. Климат, реки, озера, водохранилища и моря могут существенно определять развитие геологических процессов и явлений и формирование инженерно-геологических условий территорий. Поэтому характеристика, оценка этих условий и прогноз их изменений во времени немыслимы без учета некоторых данных, характеризующих климат и гидрологические особенности рек и водоемов рассматриваемого района.

Из метеорологических данных первостепенное значение обычно имеют следующие.

1. Количество (сумма) атмосферных осадков и их распределение по временам года, в том числе высота снежного покрова в пределах разных элементов рельефа, норма осадков, коэффициент, норма и модуль стока. При характеристике распределения осадков во многих случаях важно обращать внимание на их интенсивность в летние месяцы.
2. Абсолютная и относительная влажность воздуха, влияющие на испарение и испаряемость влаги, водный баланс местности, влажностный режим горных пород в зоне аэрации и другие явления.
3. Распределение температуры воздуха по отдельным периодам времени года, их средние, максимальные и минимальные значения, годовые, сезонные и суточные колебания.
4. Направление и скорость ветра, периоды продолжительного действия ветров господствующих направлений. Розы ветров: годовая и для характерных периодов года.
5. Глубина сезонного промерзания горных пород на разных элементах рельефа и разной их экспозиции, на поверхностях, покрытых снегом, и обнаженных, в разных горных породах.

Все эти метеорологические данные, характеризующие климатические особенности района, можно получить из справочников, специальных изданий (ежегодники, кадастры) гидрометеорологической службы России, на метеостанциях и в гидрометеоуправлениях. Однако иногда возникает необходимость в учете местных, локальных микроклиматических условий. В этих случаях при производстве инженерных изысканий организуют наблюдения за отдельными элементами или комплексом элементов метеорологических условий. При организации таких наблюдений необходимо руководствоваться «Наставлениями гидрометеорологическим станциям и постам гидрометеорологической службы РФ». Поэтому для того, чтобы обеспечить должный уровень инженерных изысканий, необходимо прежде всего строго придерживаться правил метеорологических наблюдений, приведенных в указанных наставлениях.

Для решения инженерно-геологических задач представляют интерес следующие гидрологические параметры рек и водоемов:

1) уровневый режим и связанные с ним явления затопления и подтопления;
2) скорости и расходы воды речных потоков. Для интересующего конкретного участка важно устанавливать значения размывающих и кри-

тических скоростей потоков и максимальные расходы по многолетним данным;

3) ледовый режим;
4) минерализация, химический состав и агрессивность поверхностных вод;
5) твердый сток, его состав и условия формирования;
6) волновые явления на водоемах и их параметры — высота волны $h = f(W, t, D, H)$; энергия волны $E = l/8h^2L$; высота вскатывания волны $h_B = 3{,}2\ kh\ tg\ a$; сила удара волны $P = y_b V^2/g$.

Определения и роль всех этих параметров гидрологических условий рек и водоемов, оказывающих влияние на развитие геологических процессов и формирование инженерно-геологических условий территорий, приведены в «Курсе инженерной геодинамики».

Сбор, обобщение и оценка гидрологических данных, а в отдельных случаях организация соответствующих наблюдений — непременное условие эффективности решения задач инженерных изысканий для обоснования проектов сооружений и инженерных работ. При проектировании крупных объектов в состав экспедиций, выполняющих инженерные изыскания, привлекаются гидрологи — для выполнения гидрологических изысканий. Инженер-геолог должен понимать значение гидрологических данных для решения инженерных задач, уметь пользоваться ими и быть знакомым с организацией и методикой таких наблюдений. Гидрологические данные, включающие исходные материалы наблюдений за режимом поверхностных вод рек, озер, водохранилищ, морей, болот и их научное обобщение, приведены в специальных выпусках и справочниках гидрометеорологической службы России.

Гидрогеологические наблюдения. Подземные воды являются важнейшим элементом инженерно-геологических условий той или иной территории. При проектировании и строительстве сооружений, рациональном использовании территорий, геологической среды подземные воды всегда имеют только инженерно-геологическое значение. Поэтому изучение подземных вод — их распространения, условий залегания, гидравлических особенностей, условий питания и разгрузки, запасов (ресурсов), режима, химизма и т. д. — необходимо производить на всех стадиях инженерных изысканий. Без должного учета влияния подземных вод на развитие геологических процессов и явлений, влажности и водоносности горных пород не могут быть сделаны правильная оценка инженерно-геологических условий территорий и прогноз их изменений. При инженерных изысканиях изучение подземных вод, как и других природных элементов, должно быть само собой разумеющимся. Такая

постановка вопроса совершенно не исключает использования при инженерных изысканиях методов гидрогеологии, как и других наук, но говорить и ставить вопрос о необходимости выполнения одновременно с инженерно-геологическими исследованиями специальных гидрогеологических — неправомерно и неправильно. Поэтому следует обратить особое внимание специалистов по инженерной геологии на необходимость хорошей их подготовки в области гидрогеологии и на важность изучения подземных вод, их режима при инженерных изысканиях.

При инженерно-геологических исследованиях режимные стационарные гидрогеологические наблюдения приходится выполнять для решения разнообразных задач. Наиболее часто их производят с целью изучения:

1) положения уровня и пьезометрических уровней подземных вод. В большинстве случаев особый интерес представляет установление периодов максимальных и минимальных положений уровней и пьезометров подземных вод и их обусловленность природными климатическими, гидрологическими или искусственными факторами;
2) условий питания подземных вод и их запасов — ресурсов;
3) связи подземных вод с поверхностными и зависимости режима первых от режима вторых;
4) взаимосвязи между отдельными горизонтами и зонами подземных вод, наличия и надежности водоупоров, как местных (локальных), так и региональных;
5) изменений режима подземных вод (уровней, ресурсов, химизма и др.) под влиянием существующих водозаборов, эксплуатации сооружений и других факторов;
6) изменений минерализации и химизма подземных вод;
7) влияния режима подземных вод на развитие геологических процессов и явлений — подтопление и заболачивание территорий, засоление горных пород, развитие оползневых и просадочных явлений, изменение микросейсмических условий и др.

Перечисленные сведения о режиме подземных вод обычно позволяют:

а) давать более обоснованную оценку инженерно-геологических условий территорий;
б) определять условия производства строительных и горных работ, условия эксплуатации сооружений, оценивать возможные масштабы водопритоков и прорывы воды в котлованы и подземные выработки и их агрессивное воздействие на подземные части конструкций сооружений;

в) разрабатывать рациональные мероприятия по осушению территорий, по борьбе с явлениями подтопления территорий и сооружений, по борьбе с подземными водами при проходке котлованов и подземных выработок, с потерями воды на фильтрацию, по улучшению мелиоративного состояния орошаемых земель и т. д.;

г) разрабатывать рациональные мероприятия по охране окружающей геологической среды, сооружений, жизни и деятельности людей от опасного развития геологических процессов, и в том числе защите поверхностных и подземных вод от загрязнения, истощения при эксплуатации сооружений и выполнении инженерных работ.

Таким образом, режимные стационарные гидрогеологические наблюдения при инженерных изысканиях могут давать очень важные материалы для технически наиболее правильного и экономически выгодного решения инженерных задач. Для постановки таких наблюдений обычно используют источники, т. е. естественные выходы подземных вод на поверхность, скважины, шурфы, колодцы, водозаборы, горные выработки. В горных выработках используют определенные участки водосборных лотков, улавливатели, зумпфы, водоприемники, насосные станции и др. По каждому пункту наблюдений необходимо иметь точные сведения о его высотном, плановом и геологическом положениях, о режиме вскрытых водоносных горизонта или зоны, находящихся под наблюдением.

Для успешного выполнения стационарных работ каждый пункт (точка) наблюдений должен быть соответствующим образом оборудован. Источники расчищены и каптированы, скважины и шурфы закреплены, а в отдельных случаях оборудованы уровнемерами, лимниграфами, водосливами, водомерами и другими техническими средствами. На каждом пункте наблюдения устанавливают точку, сечение или уровень, от которых производят то или иное измерение при наблюдениях. При выборе пунктов наблюдений необходимо, чтобы каждый из них был расположен в типичных гидрогеологических условиях, вблизи зоны влияния проектируемого или эксплуатируемого сооружения или непосредственно в ней, в пределах осваиваемой территории, и был доступным в любой период времени года.

Основными гидрогеологическими параметрами, за изменениями которых обычно ведут наблюдения, являются уровни и пьезометрические уровни подземных вод, дебиты источников, скважин, водозаборов, расходы и притоки воды, ее минерализация, химический состав и температура. Наблюдения ведут по установленному графику, который определяется особенностями режима изучаемого водоносного горизонта или зоны, характером и амплитудой

колебания их параметров, стадией инженерных изысканий и решаемыми задачами. График наблюдений должен обеспечивать выявление закономерностей режима подземных вод во времени (суточного, сезонного, годового, многолетнего, эпизодического) и в пространстве, в естественных условиях и нарушенных различными искусственными факторами.

В соответствии с «Методическим руководством» Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии в начальный период наблюдений, когда режим подземных вод еще неизвестен, наблюдения за режимом грунтовых вод рекомендуется проводить 10 раз в месяц (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 и 30-го числа), а за режимом напорных вод — 5 раз в месяц (6, 12, 18, 24 и 30-го числа). В периоды паводков, снеготаяния, ливневых или продолжительных дождей или интенсивного искусственного нарушения режима наблюдения на отдельных характерных точках рекомендуется проводить ежедневно, а иногда не менее 2–3 раз в день до тех пор, пока не прекратится резкое изменение гидрогеологических параметров, характеризующих режим водоносного горизонта или зоны.

Закономерности режима подземных вод и их обусловленность могут быть выявлены только в том случае, если режимные гидрогеологические наблюдения сопровождаются соответствующими другими наблюдениями: метеорологическими, гидрологическими, за развитием оползневых явлений, работой сооружений и др. Выявляя плавные или резкие изменения в режиме подземных вод и рассматривая их на фоне изменений других природных или искусственных явлений, обычно можно объяснить причины и масштабы изменений параметров подземных вод во времени и в пространстве. Это позволяет принимать обоснованные инженерные решения по управлению режимом подземных вод и предупреждению их вредного или опасного влияния.

Многочисленные наблюдения на самых различных участках указывают на тесную связь периодов интенсивных и повсеместных оползневых подвижек на склонах и откосах с периодами обильных и продолжительных дождей, интенсивного таяния снега, высокого стояния уровня воды в водоемах, а также с разнообразными формами проявления подземных вод. Это свидетельствует о несомненной причинной связи образования оползней с климатическими условиями местности и подземными водами.

На рисунке 6.4 приведены графики колебания уровня грунтовых аллювиальных вод на одном из участков, составленные по результатам наблюдений в течение почти 4 лет. Из анализа этих графиков следует, что уровневый режим грунтовых вод на участках, прилегающих к реке (колодцы 6, 9,

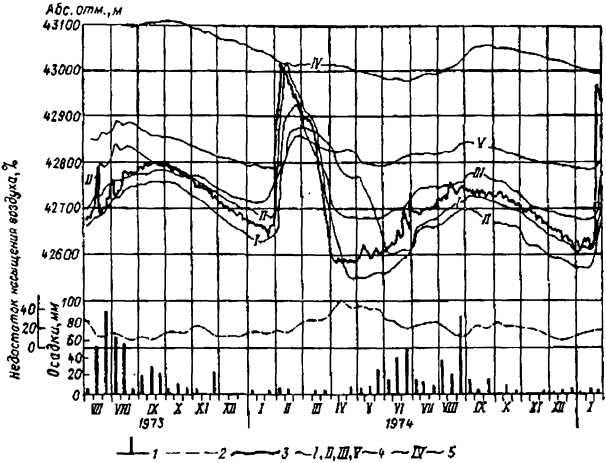
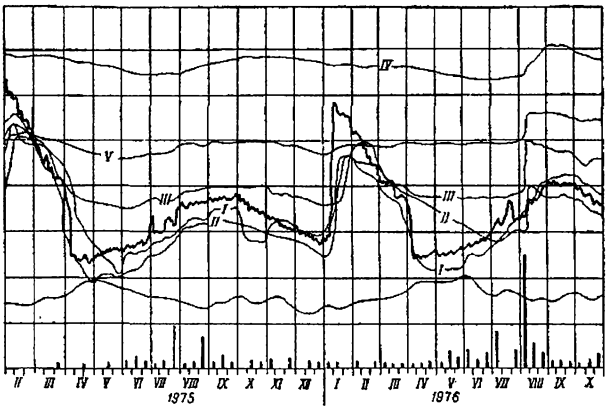


Рис. 6.5. Графики колебания грунтовых вод на одном
1 — сумма осадков в декаду, мм; 2 — график недостатка нсыщения воздуха, %;
вых вод по данным наблюдений в колодцах, расположенных в зоне влияния
в колодце, расположенном

12, 16), полностью определяется ее уровневым режимом. На участке, удаленном от реки (колодец 10), уровневый режим грунтовых вод определяется климатическими факторами — распределением осадков в течение года и недостатком насыщения воздуха. Из графиков виден не только характер обусловленных закономерностей в уровневом режиме грунтовых вод, но и размеры изменений, характеризующие масштаб явлений. В колодцах, расположенных на участках, прилегающих к реке, амплитуды колебаний уровня грунтовых вод достигают почти 3 м, а в колодцах, удаленных от реки, они меньше 1 м.

На рисунках 6.5, *а, б, в, г* показан план рассматриваемого участка с гидроизогипсами на характерные периоды стояния уровня грунтовых вод — зимний минимум, зимний максимум, весенний минимум и летний максимум.



из участков по данным многолетних наблюдений:
3 — график колебания уровня воды в реке; 4 — график колебния уровня грунтореки: I–I — колодец 1-й; II–II — 9-й; III–III — 12-й; V–V — 10-й; IV–IV — то же вне зоны влияния реки

Такие планы дополняют графики (см. рис. 6.4) и позволяют полнее представить изменения положения уровня грунтовых вод на рассматриваемом участке не только во времени, но и в пространстве. Практическое значение изменений положения уровня грунтовых вод для оценки инженерно-геологических условий территорий иллюстрируют рисунки 6.7 и 6.8.

На рисунке 6.6 приведены графики, характеризующие режим напорных водоносных горизонтов Кунгурской толщи отложений на одном из участков Русской платформы. Изменение положения пьезометрических уровней верхних горизонтов за период 3-летних наблюдений полностью соответствует изменениям уровня воды в реке. Это указывает на их полную взаимосвязь и зависимость режима водоносных горизонтов от режима реки. Так как реки имеют один основной источник питания — атмосферные осадки, то можно

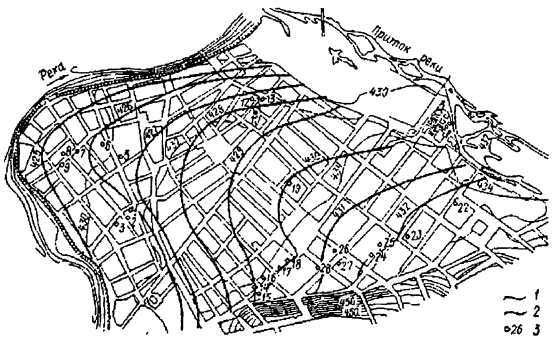


Рис. 6.5а. План участка с гидроизогипсами, характеризующими положение уровня грунтовых вод на 30.03.1974 г. (зимний минимум): 1 — горизонтали релеьефа поверхности; 2 — гидроизогипсы через 1 м; 3 — колодец и его номер

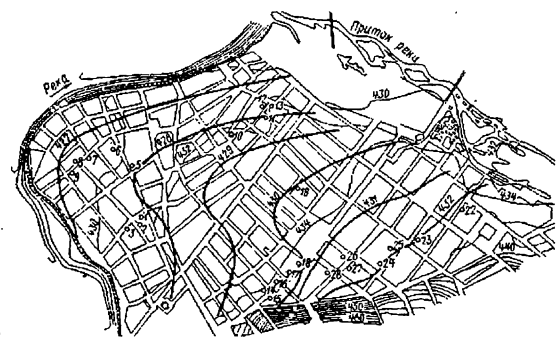


Рис. 6.5б. План участка с гидроизогипсами, характеризующими положение уровня грунтовых вод на 22.01.1975 г. (зимний максимум).
Усл. обозначения см. на рис. 6.6а

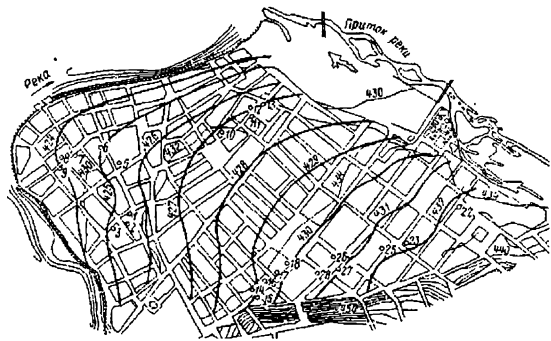


Рис. 6.5в. План участка с гидроизогипсами, характеризующими положение уровня грунтовых вод на 12.05.1975 г. (весенний минимум).
Усл. обозначения см. на рис. 6.6а

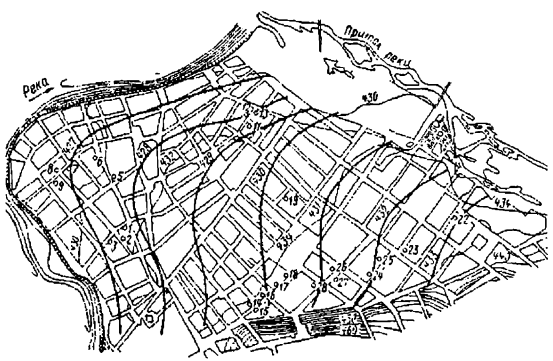


Рис. 6.5г. План участка с гидроизогипсами, характеризующими положение уровня грунтовых вод на 18.08.1975 г. (летний максимум).
Усл. обозначения см. на рис. 6.6а

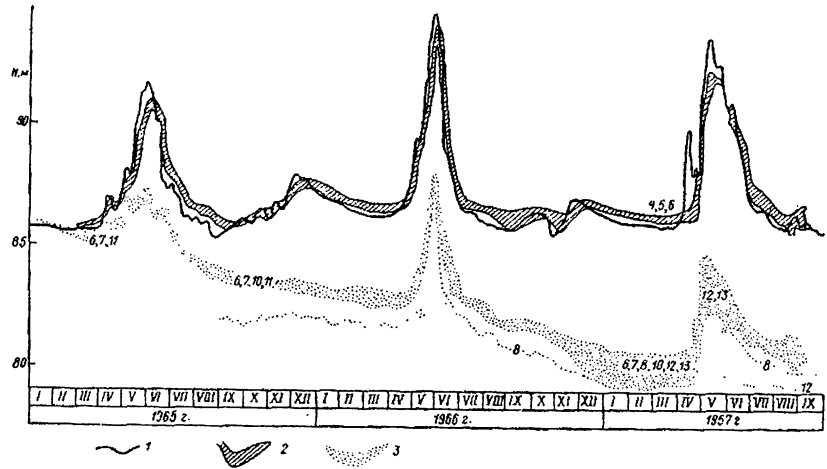


Рис. 6.6. График колебания пьезоэлектрического уровня напорных вод на одном из участков по данным многолетних наблюдений:
1 — уровень воды в реке; 2 — пьезометрические уровни верхних водоносных горизонтов по скв. 4, 5, 6, 12, 13; 3 — пьезометрические уровни нижних водоносных горизонтов по скв. 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13

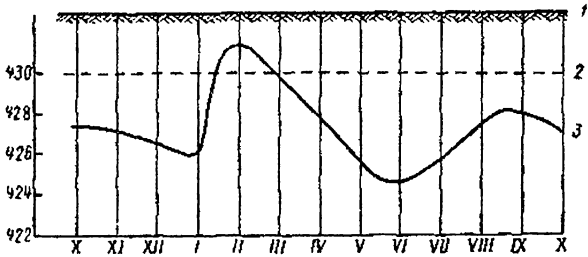


Рис. 6.7. Влияние колебаний уровня грунтовых вод на подтопление территории: 1 — поверхность рельефа; 2 — уровень заложенияй подошвы фундаметов сооружений; 3 — уровень поверхности грунтовых вод в разные периоды времени. Римские цифры — месяцы года

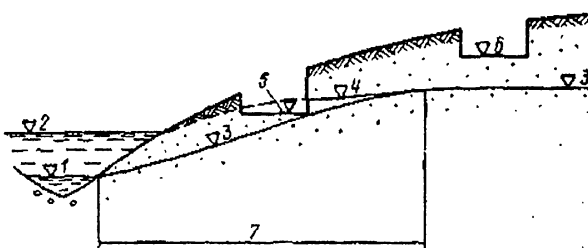


Рис. 6.8. Влияние речного паводка на подтопление территории: 1 — уровень воды в реке в межень; 2 — уровень воды в реке в паводок; 3 — положение уровня грунтовых вод в межень; 4 — положение уровня грунтовых вод при их подпоре в паводок; 5–6 — уровни заложения подошвы фундаментов сооружений; 7 — зона влияния паводка

полагать, что режим реки и верхних водоносных горизонтов в целом определяются климатическими условиями.

Уровневый режим нижних водоносных горизонтов также отражает его зависимость от режима реки, но, как видно на графиках, пьезометрические уровни этих горизонтов непрерывно снижаются. Такая тенденция четко сохранялась, начиная с апреля-мая 1945 г., более 2,5 лет. Выяснение причин такого состояния режима нижних водоносных горизонтов показало, что зона влияния крупного водозабора непрерывно распространялась и в 1945 г. достигла рассматриваемого участка.

Приведенные примеры наглядно подтверждают положение о том, что нельзя гидрогеологические наблюдения проводить вне связи с изучением других природных или искусственных факторов. В то же время они показывают, как следует обрабатывать результаты режимных стационарных гидрогеологических наблюдений. При такой обработке полезно составлять хронологические графики (рис. 6.4, 6.6), разнообразные гидрогеологические карты (например, рис. 6.6, *а, в, б, г*) и другие графики и чертежи. Для анализа изменений отдельных параметров водоносных горизонтов и зон полезно применять вероятностно-статистические методы обработки материалов наблюдений.

Геотермические наблюдения. Изучение ледового и термического режимов. Для решения разнообразных инженерных задач большое значение имеют данные о температуре горных пород на той или иной глубине их залегания. Так, например, во многих случаях глубина заложения фундаментов зданий, сооружений и некоторых подземных коммуникаций должна быть не менее расчетной глубины промерзания горных пород, чтобы предупредить опасное воздействие на них сил морозного пучения. Следовательно, для решения таких массовых инженерных задач необходимо располагать надежными данными о глубине промерзания горных пород (мощность деятельного слоя), т. е. о распределении в них температуры по глубине.

Принципы строительства сооружений в районах распространения многолетней мерзлоты определяются ее режимом. Различают участки с многолетней мерзлотой, имеющей более или менее устойчивый режим и низкие температуры (для песков и супесей соответственно ниже –0,3 и –0,6 °С, для суглинков и глин ниже –1,0 и –1,5 °С) и участки с многолетней мерзлотой, имеющей неустойчивый режим, с температурой пород, близкой к 0 °С, т. е. от 0° до –0,1, –0,2, –0,3 °С). В любом случае необходимо располагать надежными данными о распределении температуры в горных породах.

В приповерхностных горизонтах земной коры ниже зоны постоянных годовых температур горных пород прослеживается зона постепенного их повы-

шения с глубиной. В разных районах скорость повышения температуры горных пород с глубиной различна — от 3–5 °С на 100 м в Молодых складчатых областях (Тихоокеанский пояс, Копетдаг, Кавказ, Крым, Карпаты) до 1 °С на 100 м в районах кристаллических щитов (Балтийский, Украинский). В соответствии с этим в отдельных районах на глубинах, представляющих практический интерес, т. е. начиная с глубины 400–500 м и глубже, температура горных пород может достигать 25–30 °С и выше, могут быть вскрыты горячие подземные воды. Высокие температуры горных пород и подземных вод могут существенно влиять на производство строительных и горных работ и эксплуатацию сооружений. Поэтому при проектировании подземных сооружений (шахт, туннелей и др.) и соответственно средств проветривания, вентиляции, охлаждения подземных выработок необходимо располагать точными данными о распределении температуры горных пород и подземных вод с глубиной. Таким образом, при инженерных изысканиях геотермические наблюдения необходимо проводить в первую очередь в следующих случаях:

1) при определении мощности деятельного слоя;
2) при определении принципа строительства зданий и сооружений в районах многолетней мерзлоты;
3) при проектировании и строительстве подземных сооружений на больших глубинах. Кроме того, необходимость в таких наблюдениях может возникнуть при решении других специальных задач, например при изучении взаимосвязи подземных вод с поверхностными, между отдельными водоносными горизонтами и зонами, при выявлении и оконтуривании областей и очагов подтока подземных вод к отдельным участкам и др. Систематические плановые геотермические наблюдения в России выполняются на метеорологических, мерзлотных и гидрогеологических станциях. Поэтому некоторые данные о распределении температуры в горных породах по тому или иному району можно получить на этих станциях, а также из фондовых и литературных источников. Для конкретного же участка расположения сооружений или осваиваемой территории геотермические наблюдения организуют при инженерных изысканиях.

В состав геотермических наблюдений обычно входит измерение температуры горных пород на тех или иных глубинах. При обобщении и анализе результатов таких наблюдений и при соответствующих инженерных расчетах переноса тепла в горных породах необходимы данные об их тепловых свойствах — теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости. Некоторые из этих данных приведены в соответствующем разделе «Инженерной

геодинамики» и других работах [9, 20]. Определение показателей этих свойств горных пород (коэффициента теплопроводности, коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости) производят в лабораторных условиях по образцам, отобранным из естественных обнажений, буровых скважин и горных выработок. Геотермические же наблюдения проводят в полевых условиях — в скважинах и подземных горных выработках.

Выбор пунктов геотермических наблюдений определяется решаемыми задачами. Как и при гидрогеологических наблюдениях, они должны быть расположены на наиболее типичных по инженерно-геологическим условиям участках, вблизи мест расположения сооружений и быть доступными для наблюдений. Наиболее точные данные получают при производстве измерений в скважинах, пробуренных с поверхности земли или из подземных горных выработок. Для наблюдений необходимо выбирать те скважины, которые находились в покое после бурения в течение 8–15 дней, т. е. в которых восстановился естественный тепловой режим горных пород. Бурение наблюдательных скважин должно производиться способами, до минимума устраняющими нарушение естественных температурных условий горных пород. Поэтому в таких скважинах нельзя производить опытные работы — откачка воды, нагнетание, прогрев скважин и др. На каждом характерном участке площадью до 1000 м^2 желательно иметь не менее 2–3 наблюдательных скважин.

Глубины, на которых производят измерения температуры горных пород, определяются составом решаемых задач. Для установления мощности деятельного слоя, т. е. суточных и сезонных колебаний температуры горных пород, следует придерживаться порядка, соблюдаемого на метеорологических станциях Гидрометеослужбы России. На этих станциях измерения температуры горных пород производят на глубинах: 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 и 3,2 м. В некоторых районах, например в Забайкалье, мощность деятельного слоя может достигать 4 м. Соответственно увеличивается и глубина режимных наблюдений за температурой горных пород в таких районах.

В районах распространения многолетней мерзлоты надо стремиться охватить геотермическими наблюдениями по возможности всю зону ее распространения — от верхней границы до нижней. Если мощность зоны мерзлых пород достигает многих десятков и сотен метров, то при обычных инженерных изысканиях измерять температуру мерзлых пород до нижней границы ее распространения обычно не представляется возможным. В таких случаях данные о температурном режиме нижних горизонтов мерзлой зоны необходимо получать из литературных и фондовых материалов и из наблюдений на мерзлотных и гидрогеологических станциях.

Измерения температуры мерзлых горных пород в верхних их горизонтах, до глубины 15–20 м, следует производить через каждый метр, а глубже — через каждые 2–3 м, стараясь получить характеристику температуры каждой петрографической разности, выделяющейся в геологическом разрезе. Для проектирования подземных сооружений температурные наблюдения должны давать характеристику горных пород на проектных отметках размещения этих сооружений. Желательно геотермическими наблюдениями охватывать всю зону горных пород, в пределах которой намечается проходка горных выработок.

Сроки и продолжительность наблюдений определяются имеющимися возможностями. Для того чтобы получить график полного цикла изменений температуры горных пород в пределах деятельного слоя или в зоне многолетнемерзлых пород, продолжительность наблюдений должна быть не менее одного года. Практически же их часто приходится ограничивать более коротким сроком, соответствующим полевому периоду инженерных изысканий. В этом случае их необходимо дополнять данными наблюдений на государственной стационарной сети метеорологических и гидрогеологических станций, расположенных в данном районе или в соседних с ним. При определении сроков наблюдений необходимо исходить из того, на каких глубинах они проводятся. В зоне суточных колебаний температуры наблюдения проводят ежедневно, в зоне сезонных колебаний — один раз в 5 или 10 дней, в зоне постоянных температур — не чаще одного раза в 10–15 дней.

Заметим, что волна холода в пределах деятельного слоя достигает максимальной глубины обычно к маю-июню или даже июлю, поэтому чтобы получить представление о мощности деятельного слоя в данном году, желательно охватить наблюдениями этот период. Естественно, что в полученные результаты надо внести соответствующие поправки на степень холодности прошедшей зимы и другие факторы, влияющие на процесс промерзания горных пород. Рекомендации по определению нормативных и расчетных значений глубины сезонного промерзания горных пород приведены в «Строительных нормах и правилах».

Для измерений температуры горных пород используют различные термометры. Наибольшее распространение в практике инженерных изысканий имеют: ртутные заленивленные, термоэлектрические (термопары) и полупроводниковые термометры сопротивлений — резисторы, обычно называемые термистрами. Описание технических средств, применяемых для геотермических наблюдений, приведено в специальной литературе. Погрешность измерений должна быть не более 0,05–0,1 °С. Результаты геотермических наблюдений обычно представляют в виде разнообразных графиков (рис. 6.9, 6.10), разрезов (рис. 6.11) и карт.

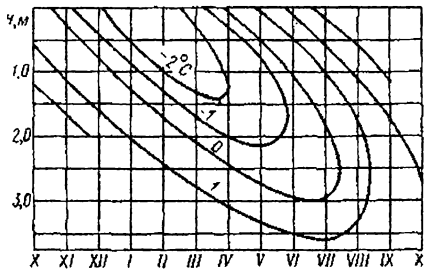


Рис. 6.9. Изоплеты, характеризующие изменение температуры горных пород на разной глубине в течение года на одной из строительных площадок. Римские цифры — месяцы года

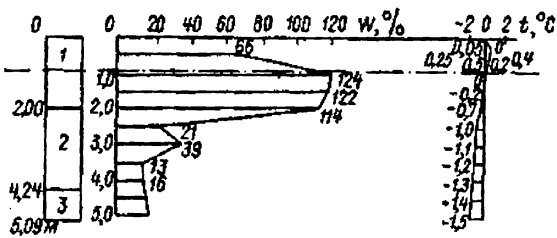


Рис. 6.10. Кривые изменения влажности и температуры горных пород с глубиной на одной из строительных площадок (по Н. Н. Цытовичу и М. Н. Сумгину): 1 — суглинок с примесью песка; 2 — супесь с галькой; 3 — суглинок с песком; штрих-пунктирная линия — граница деятельного слоя на 09.10.1934 г.

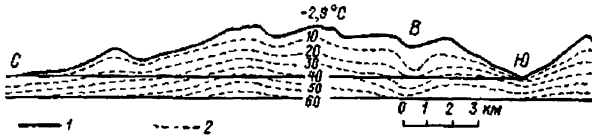


Рис. 6.11. Геоизотермы по профилю Симплонского туннеля: 1 — ось туннеля; 2 —геоизотермы (в точке *В* снижение изотерм вызвано наличием обильного холодного подземного потока)

Глава 6.7. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

В самом общем виде мониторинг можно определить как организованную с контрольно-диагностическими целями пространственно-временную систему наблюдений за изменениями природных и природно-технических систем, объектов и отдельных составляющих их частей во взаимодействии с окружающей средой. Таким образом, мониторинг представляет собой систему сбора, обработки и хранения информации, необходимой для решения определенных задач.

Одной из таких задач, которую можно отнести к категории главных, представляется выявление тенденций изменения состояния окружающей среды, отдельных ее компонентов, природных и природно-технических систем, объектов под влиянием природных или техногенных процессов и составление долгосрочных и краткосрочных прогнозов таких изменений. Подобного рода данные используются для *принятия управленческих решений*, цель которых, в свою очередь, состоит в предотвращении или снижении до минимума ущерба от негативных проявлений природных и техногенных процессов.

Глобальный *экологический мониторинг* проводится с целью получения информации, необходимой для решения задачи сохранения биосферы и обеспечения развития цивилизации. Эта задача может быть решена при наличии данных, достаточных для составления достоверных прогнозов неблагоприятных геодинамических и геофизических явлений в целях предотвращения природных и природно-техногенных катастроф или уменьшения наносимого ими ущерба.

Наиболее сложным по своей структуре является *мониторинг окружающей среды, поскольку предполагает организацию многоуровневой и многокомпонентной комплексной системы наблюдений*. Применительно к наблюдениям за изменением окружающей среды следует различать мониторинг *глобальный, государственный, региональный, локальный и детальный*, как это показано на рисунке 6.12.

Приводимая схема отображает структуру мониторинга на каждом из уровней, а также организационную его принадлежность. Каждый из уровней, начиная с первого, низшего (детального), предполагает организацию своей собственной системы наблюдений, сбора, обработки и передачи информации (мониторинга), которая в качестве подсистемы входит в систему более высокого уровня. В то же время на каждом из уровней, учитывая целевую направленность мониторинга, приходится решать, помимо общего слежения за экологической обстановкой, вполне определенные задачи, связанные с изучением

Скан страницы отсутствует

Скан страницы отсутствует

Таблица 6.1

Задачи основных и вспомогательных методов геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях

Задачи исследований	Геофизические методы	
	Основные	Вспомогательные
Определение геологического строения массива		
Рельеф кровли скальных и мерзлых грунтов, мощность нескальных и талых перекрывающих грунтов	Электроразведка методами электропрофилирования (ЭП) и вертикаального электрического зондирования по методу кажущихся сопротивлений (ВЭЗ); сейморазведка методом преломленных (МПВ) и отраженных (МОГТ) волн	ВЭЗ по методу двух составляющих (ВЭЗ МДС); частотное электромагнитное зондирование (ЧЭМЗ); дипольно-электромагнитное профилирование (ВСП); непрерывное сейсмоакустическое профилирование на акваториях
Расчленение разреза. Установление границ между слоями различного литологического состава и состояния в скальных и дисперсных породах	ВЭЗ; МВП; различные виды каротажа — акустический, электрический, радиоизотопный	ВЭЗ МДС; ВЭЗ по методу вызванных потенциалов (ВЭЗ ВП); ЧЭМЗ; вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП); непрерывное сейсмоакустическое профилирование на акваториях
Местоположение, глубина залегания и форма локальных неоднородностей		
Зоны трещиноватости и тектонических нарушений, оценки их современной активности	ВЭЗ; ВЭЗ МДС; круговое вертикальное зондирование (ВЭЗ); метод естественного поля (ПС); МПВ; МОГТ; ВСП; расходометрия; различные виды	ВЭЗ ВП; радиоволновое просвечивание; ДЭМП; магниторазведка, регистрация естественного импульса электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ)
Карстовые полости и подземные выработки	ЭП; ВЭЗ; ВЭЗ; ВСП; расходометрия, резистивиметрия, газово-эманационная съемка	МГОТ; сейсмоакустическое просвечивание; радиоволновое просвечивание; гравиразведка; георадиоразведка
Погребенные останцы и локальные переуглубления в скальном основании	МОГТ; ВЭЗ; ВЭЗ МДС; ЭП; гравиразведка; магниторазведка; газово-эманационная съемка	ДЭМП; сейсмическое просвечивание, георадиолокация
Льды и сильнольдистые грунты	ЭП; ВЭЗ; ВЭЗ МДС; МПВ; различные виды каротажа	ВЭЗ ВП; ДЭМП; ЧЭМЗ; микромагнитная съемка, гравиразведка
Межмерзлотные воды и талики	ЭП; ВЭЗ МДС; термометрия	ПС; ВЭЗ ВП

Окончание табл. 6.1

Задачи исследований	Геофизические методы	
	Основные	Вспомогательные
Изучение гидрогеологических условий		
Глубина залегания уровня подземных вод	МПВ; ВЭЗ	ВЭЗ ВП
Глубина залегания, мощность линз соленых и пресных вод	ЭП; ЭП МДС; ВЭЗ; резистивиметрия	ВЭЗ МДС; ВЭЗ ВП; ЧЭМЗ; расходометрия
Динамика уровня и температуры подземных вод	Стационарные наблюдения ВЭЗ; МПВ; нейтрон-нейтронный каротаж (ННК); термометрия	–
Направление, скорость движения, места разгрузки подземных вод, изменение их состава	Резистивиметрия; расходометрия; метод заряженного тела (МЗТ); ПС; ВЭЗ	Термометрия; спектрометрия
Загрязнение подземных вод	ВЭЗ; резистивиметрия	ПС

Примечание. В сложных инженерно-геологических условиях ВЭЗ проводится в модификации ВЭЗ МДС.

Обозначения: ЭП — электропрофилирование; ВЭЗ — вертикальное электрическое зондирование; ВЭЗ МДС — вертикальное электрическое зондирование по методу двух составляющих; ЧЭМЗ — частотное электромагнитное зондирование; ЭП МДС — электропрофилирование по методу двух составляющих; ДЭМП — дипольно-электромагнитное профилирование; ВЭЗ ВП — вертикальное электрическое зондирование вызванных потенциалов; КВЭЗ — круговое вертикальное электрическое зондирование; ПС — естественное электрическое поле; УЭС — удельное электрическое сопротивление; МЗТ — метод заряженного тела; ЕИЭМПЗ — естественное импульсное электромагнитное поле Земли; МПВ — сейсморазведка методом преломленных волн; МОВ — сейсморазведка методом отраженных волн; МОГТ — сейсморазведка методом общей глубинной точки; ВСП — вертикальное сейсмическое профилирование; ОГП — сейсморазведка методом общей глубинной площадки; ННК — нейтрон-нейтронный каротаж; ГТК — гамма-гамма-каротаж.

ЛИТЕРАТУРА

Литература к разделу 1

1. Геодезия. Геодезические и фотограмметрические приборы / Н. Н. Ворошков, В. С. Плотников, Е. И. Калантаров, А. Н. Голубев, П. Н. Кузнецов, Х. К. Ямбаев. — М.: Недра, 1991.
2. Инженерная геодезия / Б. Клюшин, М. И. Кисилев, Д. Ш. Михелев, В. Д. Фельдман / Под ред. Д. Ш. Михелева. — М.: Высшая школа, 2000.
3. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. СНиП 11-02-96. — М.: ПНИИИС, 1997.
4. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. СП 11-104-97. — М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997.
5. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. — М.: Недра, 1990.
6. Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:100 и 1:500. — М.: Недра, 1982.
7. *Клюшин Е.Б., Михелев Д.Ш.* Инженерная геодезия. — М.: Недра, 1990.
8. *Кузнецов П.Н., Васютинский И.Ю., Ямбаев Х.К.* Геодезическое инструментоведение. — М.: Недра, 1984.
9. *Куштин И.Ф.* Геодезия. — М.: Приор, 2001.
10. *Куштин И.Ф.* Справочник техника-геодезиста. — М.: Недра, 1993.
11. *Куштин И.Ф.* Уравнивание геодезических построений. — Ростов н/Д: РГСУ, 1999.
12. *Куштин И.Ф., Куштин В.И.* Инженерная геодезия. — Ростов н/Д, 2002.
13. *Куштин И.Ф., Бруевич П.Н., Лысков Г.А.* Справочник техника-фотограмметриста. — М: Недра, 1988.
14. *Медведев Е.М., Григорьев А.В.* С лазерным сканированием на вечные времена // Геопрофи, 2003. — № 1.
15. *Михелев Д.Ш., Лобанов А.А., Михелев Ю.Д.* О требованиях к топографической съемке в масштабе 1:200 // Геопрофи, 2004. — № 6.
16. Справочник геодезиста в двух книгах / Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука. — М.: Недра, 1985.
17. Справочное пособие по прикладной геодезии / Под ред. В.Д. Большакова. — М.: Недра, 1987.
18. *Сердюков В.М.* Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. — М.: Недра, 1977.
19. *Стороженко А.Ф., Некрасов О.К.* Инженерная геодезия. — М.: Недра, 1993.
20. *Фельдман М.И, Фостиков А.А.* Фотограмметрия. — М.: Недра, 1993.
21. *Шилов П.И., Федоров В.И.* Инженерная геодезия и аэрогеодезия. — М.: Недра, 1971.
22. *Яковлев Н.В.* Высшая геодезия. — М.: Недра, 1989.

Литература к разделам 2–6

1. *Алексеевский Г.В.* Буровые установки Уралмашзавода. — М.: Недра, 1981.
2. *Афанасьев И.С., Душин А.И.* Бурение скважин при разведке месторождений строительных материалов. — Л.: Недра, 1980.
3. *Баранов В.И.* Радиометрия. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
4. *Бейсибаев А.М.* Бурение скважин и горно-разведочные работы: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности гидрогеология и инженерная геология. — М.: Недра, 1980.
5. *Богословский В.А. и др.* Экологическая геофизика. — М.: МГУ, 2000.
6. *Бондарик Г.К.* Динамическое и статическое зондирование грунтов в инженерной геологии. — М.: Недра, 1970.
7. *Бондарик Г.К., Комаров И.С., Ферронский В.И.* Полевые методы инженерно-геологических исследований. — М.: Недра, 1967.
8. *Гокфельд Б.Л., Жорник Г.В.* Полевые методы испытаний грунтов. — Киев: Будивельник, 1973.
9. Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский; Ред. кол.: М.И. Агошков, Н.К. Байбаков, А.С. Болдырев и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1984. Т. 1.
10. ГОСТ 25100-82. Грунты. Классификация. — М., 1982.
11. *Далматов Б.И.* Механика грунтов, основания и фундаменты. — М., 1981.
12. *Дахнов В.Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Гостоптехиздат. — М., 1955.
13. *Дахнов В.Н.* Промысловая геофизика. — М.: Гостоптехиздат, 1959.
14. *Заборовский А.И.* Геофизические методы разведки. — М., 1932.
15. Земляные работы: Справочник строителя. — М., 1984.
16. *Золотарев Г.С.* Методика инженерно-геологических исследований: Учебник. — М.: Изд-во МГУ, 1990.
17. *Каленов Е.Н.* Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования. — М.: Гостоптехиздат, 1957.
18. *Климентов П.П., Кононов В.М.* Динамика подземных вод: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1985.
19. *Климентов П.П., Кононов В.М.* Методика гидрогеологических исследований: Учебник для горно-геологических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1989.
20. *Колоков О.В., Хоменко Н.П.* Охрана окружающей среды при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. — Киев; Донецк: Вища школа, 1986.
21. *Ливчак В.Ф., Воронов Ю.В.* Охрана окружающей среды: Учеб. пособие. — М.: Стройиздат, 1988.

22. *Литвиненко О.К.* Геологическая интерпретация геофизических данных: Учеб. пособие. — М.: Недра, 1983.
23. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. — Л.: Недра, 1977.
24. *Ломтадзе В.Д.* Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. — Л.: Недра, 1972.
25. *Масленников И.К., Матвеев Г.И.* Инструмент для бурения скважин. — М.: Недра, 1987.
26. *Матвеев Б.К.* Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1982.
27. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / Под ред. М.И. Фазлуллина; ВНИИГИИГ. — М.: Недра, 1985.
28. *Минаев Б.П., Сидоров Н.А.* Практическое руководство по испытанию скважин. — М.: Недра, 1981.
29. Общая геофизика: Учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. В.А. Магницкого. — М.: МГУ, 1995. 317 с.
30. *Огильви А.А.* Геофизические методы исследований. — М.: Изд-во МГУ, 1962. – 420 с.
31. *Огильви А.А.* Задачи и методы инженерной геофизики // Вести. Моск. ун-та. 1957. № 3.
32. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. — М.: Недра, 1990.
33. *Огильви А.А.* Роль геофизических методов исследований при поисках и разведке подземных вод // Тр. Совещания по вопросам сооружения и оборудования буровых скважин. — М., 1955.
34. *Орленок В.В.* Основы геофизики: Учеб. пособие. — Калининград, 2000.
35. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых / Е.О. Погребицкий, Н.В. Иванов, А.В. Скропышев и др. — М.: Недра, 1968.
36. Пособие по инженерным изысканиям для строительства. — М.: Стройиздат, 1974.
37. Практикум по геофизическим методам исследований / З.Н. Кузьмина, В.Н. Никитин, А.А. Огильви, В.К. Хмелевский. — М.: Изд-во МГУ, 1970.
38. *Рац М.В.* Неоднородности горных пород и их физических свойств. М., Недра, 1968.
39. Рекомендации по выбору и эффективному применению способов бурения инженерно-геологических скважин в различных природных и геологических условиях. — М.: Стройиздат, 1974.
40. Руководство по геологической документации при инженерных изысканиях для строительства. — М.: Стройиздат, 1969.

41. *Сабитов А.А., Зайнулин И.И., Ковальский Ф.Н. и др.* Минеральное сырье. Глина: Справочник / Науч. ред. А.С. Филько, Б.Ф. Горбачев, У.Г. Дистанов. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.
42. *Санглера С.* Исследование грунтов методом зондирования. — М.: Стройиздат, 1971.
43. *Сементовский Ю.В.* Минеральное сырье. Камни облицовочные: Справочник / Науч. ред. А.С. Филько. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.
44. *Сементовский Ю.В., Бирюлев Г.Н.* Минеральное сырье. Сырье песчано-гравийное: Справочник / Науч. ред. А.С. Филько. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.
45. *Сементовский Ю.В., Сематоров П.П.* Минеральное сырье. Строительные камни и заполнители бетона: Справочник / Науч. ред. А.С. Филько. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.
46. СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений. — М., 1985.
47. Справочник геофизика: В 5 т. / Под ред. Е.А. Мудрецова. — М.: Недра, 1968.
48. Справочник геофизика. Комплексирование методов разведочной геофизики. — М.: Недра, 1984.
49. Справочник геофизика. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). 2-е изд. — М.: Недра, 1984.
50. Справочник геофизика. Электроразведка. — М.: Недра, 1980.
51. Справочник по горнорудному делу / Под ред. В.А. Гребонюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. — М.: Недра, 1983.
52. Справочное руководство гидрогеолога: В 2 т. / В.М. Максимов, М.Н. Веригин и др.; Под ред. В.М. Максимова. 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Недра, 1979.
53. Указания по зондированию грунтов для строительства. СН 448.
54. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. — М., 1983.
55. *Ширяев В.Н., Карпов А.А.* Организация оснащения инженерно- геологических изысканий. — М.: Недра, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

Раздел 1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ
(д-р техн. наук, проф. И.Ф. Куштин, д-р техн. наук, проф. В.И. Куштин)

Глава 1.1. Государственная геодезическая сеть 4
1.1.1. Геодезические сети, их назначение, классификация 4
1.1.2. Необходимая плотность и точность построения государственной геодезической сети 5
1.1.3. Основные методы построения государственной геодезической сети 8
1.1.4. Государственная геодезическая сеть. Программа Ф. Н. Красовского. Основные положения 1954–1961 гг. 11
1.1.5. Программа автономных методов спутниковых координатных определений 19
1.1.6. Государственная нивелирная сеть. Классификация и основные характеристики нивелирных сетей 23
1.1.7. Нивелирование I класса 25
1.1.8. Нивелирование II класса 26
1.1.9. Нивелирование III класса 27
1.1.10. Нивелирование IV класса 28
1.1.11. Техническое нивелирование 28
Глава 1.2. Сгущение геодезической сети 29
1.2.1. Классификация и характеристика геодезической сети сгущения .. 29
1.2.2. Триангуляция 1 и 2 разрядов 32
1.2.3. Полигонометрия 31
1.2.4. Способ бездиагональных четырехугольников 37
1.2.5. Съемочная геодезическая сеть (съемочное обоснование) 39
1.2.6. Теодолитный и тахеометрический ходы. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости. Определение координат точек теодолитного хода 42
1.2.7. Вычисление отметок точек тахеометрического хода 52
Глава 1.3. Топографические съемки 55
1.3.1. Общие сведения о топографических съемках 55
1.3.2. Теодолитная съемка 58

1.3.3. Тахеометрическая съемка ... 62
1.3.4. Мензульная съемка ... 66
1.3.5. Нивелирование поверхности ... 68
1.3.6. Цифровые и математические модели местности ... 69
1.3.7. Топографическая съемка в масштабе 1:200 ... 70
1.3.8. Обновление топографических планов ... 72
Глава 1.4. Геодезические работы в строительстве ... 73
1.4.1. Виды и задачи инженерных изысканий ... 74
1.4.2. Изыскания площадных сооружений ... 74
1.4.3. Изыскания для линейных сооружений ... 75
1.4.4. Детальная разбивка закруглений. Вынос пикетов на кривую ... 85
1.4.5. Переходные кривые ... 88
1.4.6. Проектирование трассы трубопроводов ... 89
1.4.7. Вертикальная планировка. Определение объемов земляных работ ... 90
1.4.8. Геодезические разбивочные работы ... 96
1.4.9. Вынос в натуру проектных углов и длин линий ... 97
1.4.10. Вынос в натуру проектных отметок, линий и плоскостей ... 99
1.4.11. Передача отметок на строительные горизонты ... 103
1.4.12. Геодезические работы на строительной площадке ... 104
1.4.13. Геодезическая сеть на строительной площадке ... 108
1.4.14. Вертикальное проектирование точек ... 110
1.4.15. Способы разбивочных работ ... 112
1.4.16. Геодезические разбивочные работы при возведении зданий и сооружений ... 123
1.4.17. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации подземных коммуникаций ... 131
1.4.18. Геодезические методы определения деформаций сооружений ... 134
1.4.19. Цифровое лазерное сканирование ... 145
1.4.20. Использование фотограмметрических и стереофотограмметрических методов в архитектуре и строительстве ... 147
1.4.21. Инженерно-гидрографические работы ... 150
1.4.22. Инженерно-геодезические изыскания в районах развития опасных природных и техноприродных процессов ... 152

1.4.23. Геодезические работы, связанные с переносом в натуру и привязкой горных выработок, геодезических и других точек 153
Глава 1.5. Геодезические приборы 154
1.5.1. Классификация угломерных приборов 154
1.5.2. Оптические теодолиты 155
1.5.3. Основные части геодезических приборов 157
1.5.4. Осевые системы и уровни теодолита 162
1.5.5. Высокоточные теодолиты 166
1.5.6. Точные и технические теодолиты 167
1.5.7. Электронные теодолиты 170
1.5.8. Гироскопический теодолит (гиротеодолит) 171
1.5.9. Лазерный теодолит 173
1.5.10. Принцип совмещенного отсчета 173
1.5.11. Поверки и юстировки теодолитов 174
1.5.12. Измерение горизонтальных углов 178
1.5.13. Измерение горизонтальных углов техническим теодолитом 181
1.5.14. Влияние на измеренные горизонтальные углы ошибок центрирования прибора и установки визирных целей (вех) 183
1.5.15. Источники ошибок при угловых измерениях и точность измерения горизонтального угла техническим теодолитом 184
1.5.16. Измерение вертикальных углов. Поверка вертикального круга 186
1.5.17. Краткие сведения о методах измерения расстояний при помощи электромагнитных волн 189
1.5.18. Фазовый метод измерения расстояний. Светодальномеры и радиодальномеры 190
1.5.19. Классификация нивелиров 193
1.5.20. Высокоточные нивелиры 193
1.5.21. Точные нивелиры 196
1.5.22. Технические нивелиры 199
1.5.23. Лазерные нивелиры 201
1.5.24. Нивелирные рейки 202

1.5.25. Исследования и поверки нивелиров с уровнями 203
1.5.26. Поверки и юстировки нивелиров с компенсатором 208
1.5.27. Исследование и компарирование нивелирных реек 210
1.5.28. Номограммные тахеометры 211
1.5.29. Электронные тахеометры 214
1.5.30. Отечественные и зарубежные электронные тахеометры 216
1.5.31. Понятие о гидростатическом и гидродинамическом нивелировании 220
1.5.32. Микронивелирование 222

Раздел 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ
(*инж. М.М. Михайлов, канд. техн. наук, доц. Э.А. Таржиманов, инж. А.А. Щеглов*)
Глава 2.1. Полевые исследования грунтов 223
2.1.1. Назначение и состав полевых опытных работ 223
2.1.2. Положение полевых опытных работ в общем комплексе геологических работ при инженерных изысканиях 226
2.1.3. Общие требования к организации и постановке полевых опытных работ 227
Глава 2.2. Испытание вертикальными статическими нагрузками (штампом) 229
Глава 2.3. Испытание прессиометром 240
Глава 2.4. Испытание на срез 247
Глава 2.5. Статическое и динамическое зондирование 253
Глава 2.6. Испытания грунтов опытными сваями малого сечения 268
2.6.1. Испытания грунтов эталонными сваями 268
2.6.2. Испытания грунтов опытными буронабивными сваями малого сечения 302

Раздел 3. ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ
(*инж. М.В. Новосельцев, инж. М.М. Михайлов*)
Глава 3.1. Проходка горных выработок 313
3.1.1. Основные требования к способам проходки и конструкциям гидрогеологических скважин 313
3.1.2. Проходка горизонтальных горных выработок, канав, шурфов 326

3.1.3. Технические средства и приборы, применяемые при гидрогеологических исследованиях 332
3.1.4. Гидрогеологические наблюдения при бурении скважин 341
3.1.5. Гидрогеологические наблюдения при проведении горных работ 346
Глава 3.2. Полевые опытно-фильтрационные работы 348
3.2.1. Основные виды полевых опытно-фильтрационных работ, их задачи и условия применения 350
3.2.2. Методы определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек 351
3.2.3. Методика организации и проведения откачек 377
3.2.4. Методика организации и проведения опытных нагнетаний и наливов в скважины и шурфы 386
3.2.5. Экспресс-опробование водоносных горизонтов 399
3.2.6. Определение направления и скорости движения подземных вод 404

Раздел 4. ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ РЕЖИМА И БАЛАНСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД
(инж. М.М. Михайлов, инж. М.В. Новосельцев)
Глава 4.1. Режим и баланс подземных вод, цели и задачи их изучения 409
Глава 4.2. Методы изучения режима подземных вод 413
Глава 4.3. Методы изучения баланса подземных вод 426
Глава 4.4. Прогноз и картирование режима подземных вод 429
Глава 4.5. Определение гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод 433
Глава 4.6. Лабораторное изучение физических свойств, химического, газового и бактериологического состава подземных вод 438
Глава 4.7. Вопросы методики отбора проб воды для лабораторных исследований и оценка качества подземных вод 443

Раздел 5. ИЗЫСКАНИЯ ГРУНТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
(д-р техн. наук, проф. Л.Р. Маилян, инж. М.В. Новосельцев, инж. М.М. Михайлов, инж. А.Л. Маилян)
Глава 5.1. Общие сведения 445

Глава 5.2. Состав изысканий грунтовых строительных материалов и общие технические требования 454
Глава 5.3. Проходка горных выработок. Бурение скважин 463
5.3.1. Ударно-канатное бурение. Область применения способа и классификация горных пород по буримости 463
5.3.2. Колонковое бурение 486
5.3.3. Алмазное бурение 492
5.3.4. Вибрационное бурение 495
5.3.5. Вибровращательное бурение 500
5.3.6. Шнековое бурение, область применения и классификация горных пород по буримости 502
Глава 5.4. Опробование месторождений строительных материалов и оценка их качества 511
5.4.1. Опробование месторождений песка и гравийно-песчаного материала 511
5.4.2. Оценка качества сырья 522
Глава 5.5. Приложения 526

Раздел 6. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ, ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ, РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ВИДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
(*д-р наук, проф. А.В. Толкачев, инж. Н.А. Скнарина, инж. М.М. Михайлов*)
Глава 6.1. Геофизические методы при гидрогеологических исследованиях 537
Глава 6.2. Ядерно-физические методы исследований 549
Глава 6.3. Методы инженерно-геологической геофизики 552
Глава 6.4. Метод преломленных волн 555
Глава 6.5. Сейсмоакустический метод 557
Глава 6.6. Стационарные наблюдения 558
Глава 6.7. Экологический мониторинг 577

Литература 582