ПНИИИС Госстроя СССР

# Рекомендации

## по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин

Москва 1986

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
(ПНИИИС) ГОССТРОЯ СССР

# Рекомендации

## по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин

Москва Стройиздат 1986

УДК 624.131.6

Рекомендовано к изданию секцией гидрогеологии и гидрологии Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

**Рекомендации** по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин/ПНИИИС.— М.: Стройиздат, 1986. — 141 с.

Даны унификация методики производства откачек воды из скважин, рекомендации по постановке и производству откачек и обработке их результатов. Приведены виды откачек и рекомендованы области их применения, а также способы бурения и подготовки скважин для откачек.

Для инженеров и техников-геологов проектно-изыскательских организаций.

Табл. 22, ил. 34.

Разработаны ПНИИИС Госстроя СССР (канд. техн. наук Е. С. Дзекцер — предисловие, разд. 1, 5; инженеры С. А. Долодаренко — пп. 2.73—2.80, 3.12—3.23; Г. А. Маменко — разд. 2, 4; А. М. Соколова — разд. 1, 2, 3, 4); ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР (кандидаты техн. наук В. С. Алексеев — пп. 2.73—2.80, 3.1—3.11, 4,8, Э. М. Хохлатов — пп. 2.19, 5.23); ВСЕГИНГЕО Мингео СССР (докт. геол.-минерал. наук Л. С. Язвин — разд. 5; канд. геол.-минерал. наук Б. В. Боревский — разд. 5; канд. техн. наук М. И. Фазлуллин — пп. 1.17, 1.18, 3.11, 5.3).

Р $\frac{3202000000-231}{047(01)-86}$ Инструкт.-нормат., I вып.-96-86

© Москва, 1986

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в области проведения инженерно-геологических и гидрогеологических исследований отсутствует единое методическое пособие по производству откачек воды из скважин и обработки их результатов для получения необходимых расчетных гидрогеологических параметров в целях их использования при проектировании зданий и сооружений, при изысканиях подземных источников водоснабжения, а также для прогноза изменений гидрогеологических условий. Это значительно снижает технический уровень и качество проведения основного из видов инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, а также достоверность получаемой при откачках информации, что существенно влияет на выбор наиболее оптимальных проектных решений.

Задачей настоящей работы является унификация методики производства откачек и обработки результатов для строительства, поэтому расширен круг вопросов, заложенных в ГОСТ 23278—78, и даны рекомендации по постановке и производству откачек и обработке их результатов для определения коэффициента водопроницаемости и других гидрогеологических параметров.

Рекомендации составлены на основе анализа и обобщения ранее разработанных ведомственных рекомендаций и руководств институтов Гидропроект Минэнерго СССР, Гипроводхоз Минводхоза СССР, Фундаментпроект Минмонтажспецстроя СССР, ПНИИИС Госстроя СССР, ВСЕГИНГЕО Мингео СССР и других с учетом результатов исследований ведущих специалистов в этой области (В. Д. Бабушкина, Ф. М. Бочевера, Б. В. Боревского, Н. Н. Веригина, Е. Е. Керкиса, В. А. Мироненко, Б. Г. Самсонова, В. М. Шестакова, Л. С. Язвина и др.) и отражают современный уровень науки и техники. При необходимости обработки данных откачек на ЭВМ рекомендуется использовать Рекомендации по обработке результатов опытных откачек на ЭВМ, разработанные в ЦНИИпроекте канд. техн. наук А. М. Комаровым.

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## Основные гидрогеологические параметры

**1.1.** Основными свойствами водовмещающей среды, определяющими закономерности движения в ней жидкости, являются пористость (пустотность) и проницаемость.

Проницаемость — это свойство породы пропускать через себя жидкость или газ под действием перепада давления (ГОСТ 23278—78).

Проницаемость характеризуется коэффициентом проницаемости

$$k_{\text{п}} = Q\mu_{\text{в}}\,\Delta l/\Delta PF, \qquad (1)$$

где $Q$ — расход жидкости; $\mu_{\text{в}}$ — вязкость жидкости (динамическая); $\Delta l$ — длина пути фильтрации; $\Delta P$ — перепад давления; $F$ — площадь поперечного сечения.

При гидрогеологических исследовниях применяется коэффициент водопроницаемости (фильтрации).

Переход от коэффициента проницаемости к коэффициенту водопроницаемости (фильтрации) осуществляется по формуле

$$k = \alpha k_{\text{п}}\,\rho_{\text{в}}/\mu_{\text{в}}, \qquad (2)$$

где $k$ — коэффициент фильтрации; $\alpha$ — коэффициент размерности при $k$ см/с $\alpha=1$, при $k$ м/сут $\alpha=864$; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды.

**1.2.** Основными гидрогеологическими параметрами водоносного пласта являются параметры, отражающие основные его водно-физические свойства — емкостные и фильтрационные, которые определяются пористостью и проницаемостью водовмещающей среды.

**1.3.** Емкостные свойства безнапорного пласта (внешняя емкость) характеризуются коэффициентом гравитационной водоотдачи $\mu$, который представляет собой отношение высвободившегося при осушении пласта количества воды к объему осушенного пласта.

Коэффициент водоотдачи выражается формулой

$$\mu = n - \rho_{\text{с}}\,w_{\text{м}}/\rho_{\text{в}}, \qquad (3)$$

где $\rho_{\text{с}}$ — плотность минеральных частиц грунта; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды; $w_{\text{м}}$ — максимальная молекулярная влагоемкость грунта; $n$ — пористость (полная влагоемкость).

Емкостные свойства напорного пласта (внутренняя емкость) определяются упругими свойствами водовмещающих пород и жидкости, заключенной в них, и характеризуются коэффициентом упругой водоотдачи $\mu^*$, представляющим собой отношение количест-

ва воды, которое может быть получено с единицы площади напорного пласта при понижении напора, к единице напора.

Коэффициент упругой водоотдачи водоносного пласта выражается формулой

$$\mu^* = \rho_в \beta^* m, \tag{4}$$

где $\rho_в$ — плотность воды; $\beta^*$ — коэффициент упругоемкости пласта; $\beta^* = n\beta_в + \beta_с$ ($\beta_в$ и $\beta_с$ — коэффициенты упругого сжатия воды и породы); $m$ — мощность пласта.

1.4. Фильтрационные свойства пластов характеризуются коэффициентом фильтрации (водопроницаемости) $k$ и коэффициентом водопроводимости $km$ ($m$ — мощность пласта, м), кроме того, они находят отражение в комплексных параметрах пласта: коэффициенте пьезопроводности для напорного пласта $\alpha = km/\mu^* = k/\beta^*$ и коэффициенте уровнепроводности $a_у = kh/\mu$ для безнапорного пласта ($h$ — мощность безнапорного пласта).

1.5. В данных Рекомендациях методы определений емкостных свойств не рассматриваются.

## Виды откачек и область их применения

1.6. Откачки воды из скважин являются основным и наиболее надежным методом полевого определения гидрогеологических параметров грунтов, расположенных ниже уровня грунтовых вод или кровли напорного пласта.

Откачки, проводящиеся при самоизливе скважин, называются выпусками.

1.7. Откачки воды из скважин проводятся по следующим технологическим схемам (ГОСТ 23278—78):

кустовая — в сложных гидрогеологических условиях, для ответственных объектов; проводятся как при одностадийном проектировании (рабочий проект), так и при двухстадийном — к проекту и рабочей документации (но преимущественно к стадии рабочей документации), а при поисках и разведке подземных вод на стадиях предварительной и детальной разведки; разновидностью кустовых откачек является групповая откачка;

одиночная — проводится на всех стадиях изысканий в зависимости от своего назначения (см. пп. 1.8, 1.9, 1,11, 1,13 — 1.16); при поисках и разведке подземных вод откачки из одиночных скважин, различные по своему назначению, проводятся независимо от стадии разведки из всех скважин.

1.8. Откачки (выпуски) подразделяются на виды: пробные, опытные, опытно-эксплуатационные. Методическое отличие этих

видов откачек (выпусков) заключается, главным образом, в продолжительности их проведения.

1.9. Пробные откачки (выпуски) проводятся из одиночных скважин с целью получения предварительной оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и химического состава подземных вод для сравнительной гидрогеологической характеристики различных участков (вариантов) или для выполнения ориентировочных расчетов.

Пробные откачки также производятся для проверки работы фильтров скважин различного назначения, а также для определения производительности разведочных скважин при назначении параметров опытных откачек.

Пробные откачки следует проводить на одну ступень понижения, продолжительность испытания зависит от цели откачки и должна быть не менее 0,5 и не более 2 сут.

1.10. Опытные откачки (выпуски) проводятся из одиночных и куста скважин.

Целью проведения опытных откачек являются:

определение основных гидрогеологических параметров пород и водоносных пластов (коэффициентов фильтрации, водопроводимости, пьезо- и уровнепроводности, водоотдачи и перетекания), радиуса влияния скважины, суммарного сопротивления ложа водотока или водоема;

изучение граничных условий водоносных пластов (горизонтов, комплексов) в плане и разрезе (взаимосвязи поверхностных и подземных вод, взаимодействия смежных водоносных горизонтов, влияние непроницаемых контуров и т. д.);

установление зависимости дебита от понижения уровня в скважине;

определение оптимальной производительности эксплуатационных скважин;

определение величин срезок уровня при изучении взаимодействия скважин;

изучение химического и бактериологического состава воды.

1.11. Опытные откачки (выпуски) из одиночных скважин проводятся для определения ориентировочных значений коэффициентов фильтрации пород и водопроводимости пластов, установления зависимости дебита от понижения, а также при изучении химического и бактериологического состава воды.

Откачки проводятся на одну ступень понижения, а для установления зависимости дебита от понижения — на 2—3 ступени. Продолжительность откачки на каждую ступень испытания должна составлять не менее 2 и не более 5 сут. При изучении химического состава подземных вод продолжительность откачки может

быть увеличена до выявления закономерности изменения состава подземных вод при их отборе.

1.12. Кустовые опытные откачки позволяют оценивать граничные условия водоносных пластов и получать все гидрогеологические параметры с наиболее высокой достоверностью.

Для изучения взаимодействия скважин, а также в случае, когда отбор воды из одной скважины не может обеспечить достаточную величину понижения (необходимую для получения достоверных результатов), проводятся групповые откачки из сближенных скважин.

Кустовые откачки проводятся при одной ступени понижения (расхода). Продолжительность кустовых откачек должна быть обоснованной и рациональной для решения поставленных задач. Она зависит от конкретной задачи проведения испытания, выбранного режима откачки, схемы куста и граничных условий пласта и, как правило, должна определяться расчетом (см. разд. 2). *Минимальная продолжительность кустовых откачек — 3 сут* (ГОСТ 23278—78).

1.13. Опытно-эксплуатационные откачки проводятся из одной или группы скважин и назначаются для установления закономерностей изменения уровня подземных вод или химического состава при заданном водоотборе в сложных гидрогеологических и (или) гидрохимических условиях. Методика проведения этого вида откачек в данных Рекомендациях не рассматривается.

1.14. Для изучения изменения фильтрационных свойств пород по глубине вскрываемого разреза или изменения химического состава подземных вод проводятся зональные (поинтервальные) откачки, которые могут быть пробными и опытными при одиночной и кустовой схеме испытания. Наиболее надежные результаты зональные откачки дают при их проведении сверху-вниз в процессе бурения скважин. В этом случае при кустовых зональных откачках для назначения зон опробования целесообразно центральную скважину бурить после проходки ближайшей наблюдательной.

Для определения изменения коэффициентов фильтрации по глубине в одиночной скважине целесообразно вместо зональных откачек проводить расходометрию.

1.5, В условиях, когда водоносный горизонт (комплекс) слагается несколькими слоями различной проницаемости, наряду с проведением зональных откачек (для изучения фильтрационных свойств каждого слоя) проводятся так называемые суммарные откачки из всего водоносного горизонта (или его части) для определения осредненного по горизонту (комплексу) коэффициента фильтрации. При этом суммарные откачки также могут быть пробными и опытными из одиночных и кустов (групп) скважин.

Суммарные откачки проводятся на одну ступень понижения. Продолжительность зависит от их назначения (см. пп. 1.9, 1.11, 1.12) и задачи изысканий.

**1.16.** Для массового опробования фильтрационных свойств пород и более качественной оценки водообильности пласта дополнительно к опытным откачкам применяются экспресс-методы, основанные на анализе наблюдений за изменением уровня воды в скважине после кратковременного возмущения напора в водоносном пласте (см. разд. 5).

Экспресс-методы допускается применять также при изучении фильтрационных свойств слабопроницаемых пород.

В зависимости от способа воздействия на водоносный пласт и конструкции скважин различаются следующие виды экспресс-откачек:

тартание;

откачки из скважин, работающих дном;

опробование скважин с применением испытателей пластов;

опережающее опробование.

**1.17.** Испытание скважин посредством испытателей пластов можно рассматривать как процесс гидродинамического возбуждения гидрогеологической системы с помощью испытательного инструмента и измерения ее реакции глубинными манометрами с целью получения гидрогеологической информации. Основная цель измерений в процессе испытания — получение индикаторной диаграммы в координатах: давление $P$ — время $T$, по которой определяются гидрогеологические параметры испытываемой зоны. Принципиальная схема испытания выглядит следующим образом: после вскрытия пласта, подлежащего испытанию, в скважину на бурильных трубах спускается испытательный инструмент в следующей последовательности: забойный башмак, хвостовик, фильтр с манометрами, пакер, испытатель пластов, приборный переводник с манометром, запорно-поворотный клапан (рис. 1).

С помощью испытателя пластов на основе расшифровки диаграмм давления (в основном, по сх. 1б) и обработки проб жидкости определяют следующие параметры: пластовое давление (уровень) испытанного горизонта, коэффициент водопроводимости, эффективную мощность проницаемых пород, коэффицинет фильтрации (проницаемости) призабойной и удаленной зон пласта, потенциальный и фактический дебит, скин-эффект, приведенный радиус скважины, коэффициент пьезопроводности горизонта, плотность пластовой жидкости, химический и газовый состав, кинематическую и динамическую вязкость жидкости, температуру пластовой жидкости.

**1.18.** Метод опережающего опробования предназначен для ис-

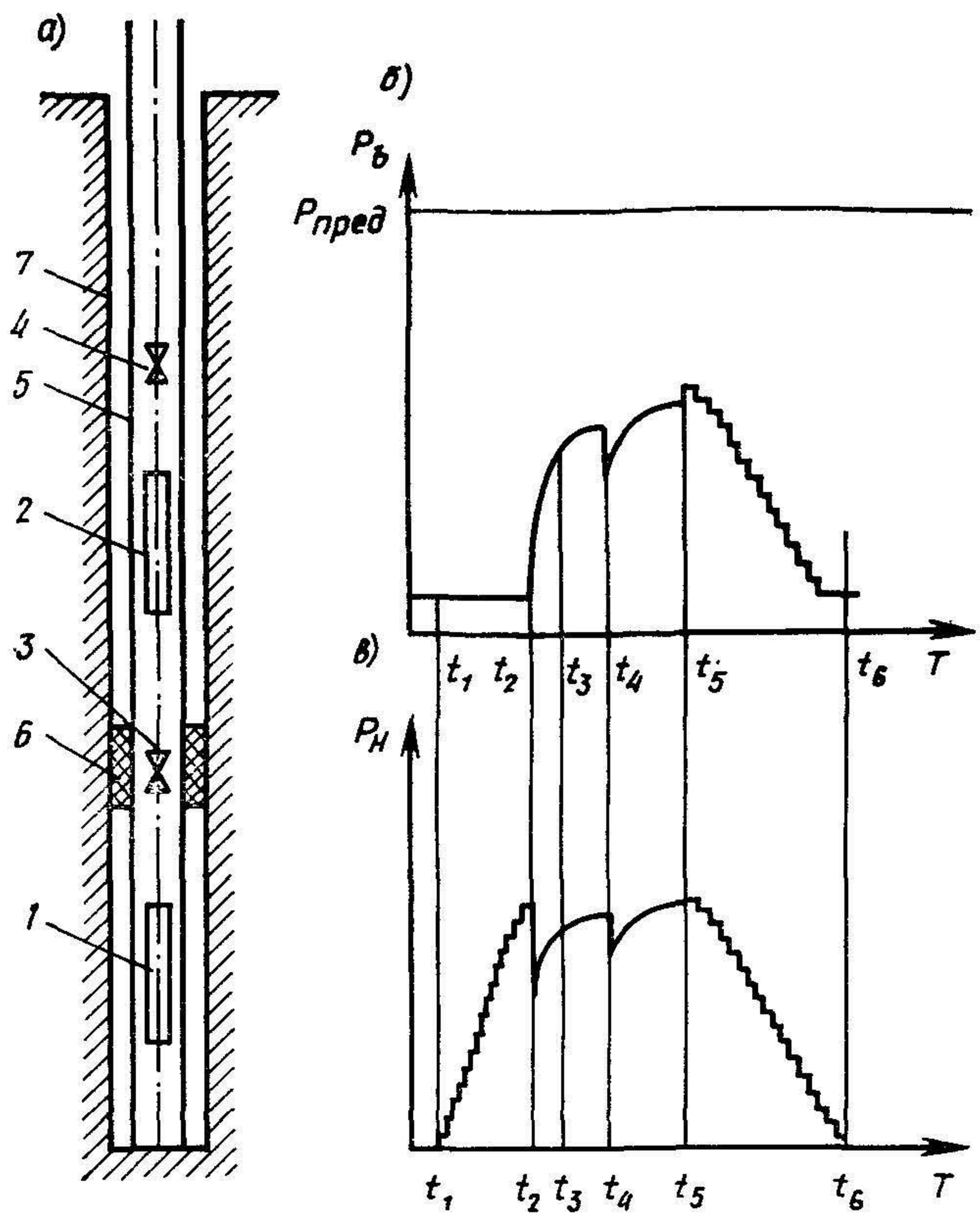



Рис. 1. Схема установки испытательного инструмента (*а*) и диаграммы верхнего (*б*) и нижнего (*в*) манометров

*1, 2* — манометры; *3, 4* — выпускной и запорный клапаны; *5* — бурильные трубы; *6* — пакер; *7* — скважина

следования гидрогеологических скважин, сооружаемых вращательным способом с глинистым раствором в рыхлых отложениях. Метод опережающего опробования позволяет исключить глинизацию опробуемого водоносного горизонта; проводить откачки без применения фильтровых колонн; производить опробование нескольких водоносных горизонтов из одной скважины без изменения ее диаметра или проведения в ней дополнительных работ по креплению, цементации, перфорации и установке цементных мостов; снизить стоимость опробования в 5—7 раз.

Сущность метода (рис. 2) заключается в следующем [20]: в скважину, заполненную глинистым раствором *4*, на бурильных

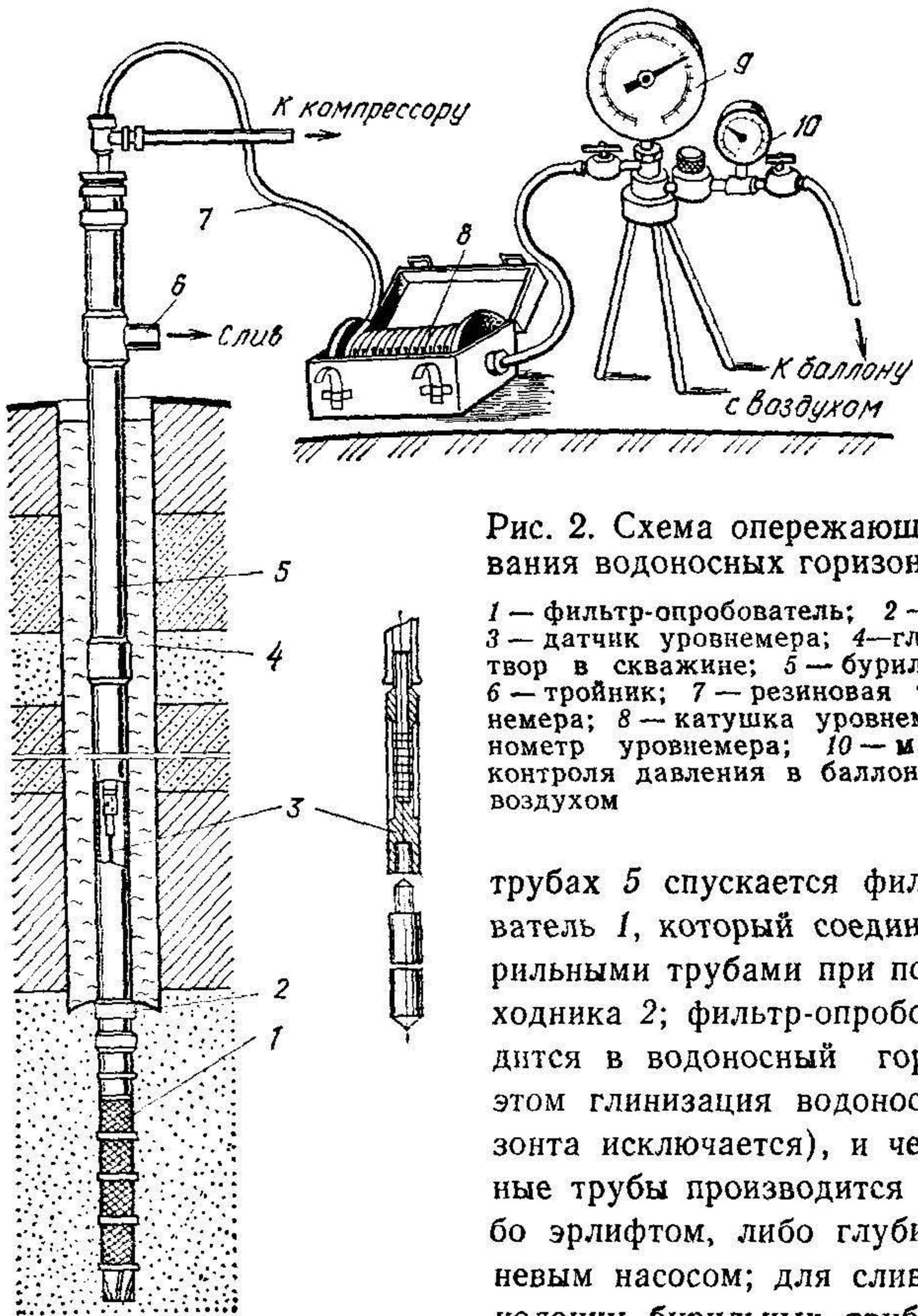



Рис. 2. Схема опережающего опробования водоносных горизонтов

*1* — фильтр-опробователь; *2* — переходник; *3* — датчик уровнемера; *4*—глинистый раствор в скважине; *5* — бурильные трубы; *6* — тройник; *7* — резиновая трубка уровнемера; *8* — катушка уровнемера; *9* — манометр уровнемера; *10* — манометр для контроля давления в баллоне со сжатым воздухом

трубах *5* спускается фильтр-опробователь *1*, который соединяется с бурильными трубами при помощи переходника *2*; фильтр-опробователь вводится в водоносный горизонт (при этом глинизация водоносного горизонта исключается), и через бурильные трубы производится откачка либо эрлифтом, либо глубинным поршневым насосом; для слива воды на колонну бурильных труб устанавливается тройник *6*. По результатам опережающего опробования помимо сведений о качестве воды, ее температуре, пьезометрическом уровне и относительной водообильности можно приближенно определить значение коэффициента фильтрации опробуемых пород [26].

## Рекомендации по выбору технологических схем испытаний при изысканиях для строительства

**1.19.** При выборе технологической схемы испытания учитывается назначение откачки, решаемые задачи для заданного типа сооружений.

**1.20.** Одиночные откачки являются наиболее распространенным видом гидрогеологических исследований и проводятся на всех ста-

диях проектирования сооружений для всех видов строительства. Одиночными откачками определяются коэффициенты фильтрации и водопроводимости пласта при решении следующих задач:

для определения водопритоков в строительные котлованы и траншеи;

для проектирования водопонизительной системы по контуру осушаемого участка при строительстве;

для определения потерь на фильтрацию из водохранилищ и каналов, а также промышленных стоков из шламо-, стокохранилищ и полей фильтрации;

для оценки фильтрационной устойчивости грунтов;

для определения параметров противофильтрационных завес и дренажей на участках гидроузлов, водохранилищ, каналов, оросительных и осушительных систем;

для проектирования дренажных систем на застроенной территории;

для ориентировочной оценки потенциальной подтопляемости территории и предварительного прогноза уровенного режима при эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения;

для ориентировочной оценки фильтрационных свойств водоносных пластов при изысканиях подземных источников водоснабжения.

**1.21.** Опытные откачки по кустовой схеме испытания позволяют определить гидрогеологические параметры на бо́льшей площади и с бо́льшей точностью, чем одиночные, так как при их выполнении исключается влияние фильтра и призабойной зоны, а при расчетах не требуется принимать условное значение радиуса влияния. При кустовых откачках, помимо коэффициента фильтрации пород и водопроводимости пласта, могут быть определены коэффициенты пьезопроводности (уровнепроводности) и водоотдачи, коэффициент перетекания, фильтрационная неоднородность и анизотропия пласта, характер формирования депрессионной воронки, степень взаимосвязи водоносных горизонтов, подземных и поверхностных вод, сопротивление русловых (донных) отложений, а при запуске индикаторов — действительные скорости фильтрации и водоотдача пород. Кроме того, кустовыми откачками при необходимости можно определить опытным путем полное сопротивление фильтра и прискважинной зоны.

Кустовые откачки необходимо выполнять:

при изысканиях для водопонизительных и дренажных систем в условиях распространения неоднородных и анизотропных пород (слоистых, трещиноватых);

для определения водопритока в береговые котлованы при проектировании строительного водопонижения;

при расчете и проектировании глубинного водопонижения в условиях взаимодействия водоносных горизонтов и влияния поверхностных водотоков;

для определения величин подпора подземных вод и ширины зон подтопления на участках водохранилищ, а также расчета потерь на фильтрацию из водохранилищ в соседние долины в сложных гидрогеологических условиях;

для определения времени понижения уровня подземных вод при работе крупных водопонизительных систем;

для определения гидрогеологических параметров, необходимых при прогнозе подтопления застроенных территорий и прогнозе уровенного режима в системах орошения и осушения, а также для прогноза повышения уровня подземных вод и распространения промышленных стоков в водоносных горизонтах при проектировании систем водоотведения;

для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и условий их формирования;

для прогноза уровенного режима, загрязнения и очищения (самоочищения) водоносных горизонтов в целях охраны окружающей среды.

**1.22.** Экспресс-откачки допускается проводить для всех видов строительства к Технико-экономическим обоснованиям (ТЭО) или Технико-экономическим расчетам (ТЭР) при сравнении отдельных вариантов размещения сооружения, при съемках и рекогносцировочных обследованиях, а также при поисках подземных источников водоснабжения.

Экспресс-откачки допускается проводить также в тех случаях, когда по техническим причинам невозможно провести пробную или опытную откачку, и при опробовании слабопроницаемых пород.

Экспресс-откачками рекомендуется определять инерционность фильтров [21].

## Достоверность определения гидрогеологических параметров методом откачек воды из скважин

**1.23.** Достоверность определения гидрогеологических параметров грунтов методом откачек воды из скважин зависит от применяемой технологической схемы откачки, продолжительности возмущения, точности выполнения замеров, степени подготовленности скважины к испытанию, а также от способов обработки и интерпретации полученных результатов.

**1.24.** Представительность и надежность результатов откачки из одиночных скважин в большой степени зависят от состояния при-

скважинной (прифильтровой) зоны водоносного горизонта, от конструкции скважины и типа фильтра.

Нарушения состояния пород в прискважинной зоне, вызванные методом проходки скважин (закольматированность или вынос мелких частиц), оказывают значительное влияние на достоверность результатов; ошибки могут быть настолько значительными, что величины гидрогеологических параметров будут не соответствовать действительным.

1.25. Откачки по кустовой схеме дают наиболее надежные и достоверные результаты, они позволяют с высокой точностью решать большой круг задач, так как результаты наблюдений по наблюдательным скважинам позволяют учитывать (или, наоборот, отпадает необходимость в учете) ряд факторов, изложенных в п. 1.24.

Кроме того, кустовая откачка позволяет установить анизотропию и неоднородность пласта, граничные условия (влияющие на результаты откачки), а также уточнить расчетную схему фильтрации.

1.26. Продолжительность откачки является одним из основных факторов получения достоверных результатов.

Результаты пробных откачек и экспресс-откачек, длительность которых находится в рамках неустановившейся фильтрации, не могут оцениваться как достаточно надежные, потому что они отражают не параметры водоносного горизонта, а фильтрационные свойства только прискважинной зоны. Поэтому достоверность результатов кратковременных испытаний в основном зависит от сохранности прискважинной зоны (см. п. 1.24).

Увеличение числа экспресс-опытов по площади не повышает достоверности определения фильтрационных свойств водоносных горизонтов.

1.27. Достоверность результатов откачки также зависит от типа фильтра, его проницаемости (см. разд. 3), длины и положения в водоносном пласте, что следует учитывать при выборе схемы опробования, особенно в анизотропных пластах (см. разд. 2).

Устройство совершенных скважин не всегда целесообразно даже в пластах небольшой мощности.

Для получения надежных результатов откачки при устройстве несовершенных возмущающих и наблюдательных скважин основным требованием является взаимное расположение их фильтров — необходимо, чтобы все поперечные оси фильтров лежали в одной плоскости, уклон которой должен совпадать с уклоном плоскости залегания опробуемого пласта.

1.28. На точность определения гидрогеологических параметров имеют влияние метрологические ошибки. Особенное влияние ока-

зывает точность замера величины понижения, что весьма существенно сказывается при пользовании формулами, в которые входит разность понижений.

**1.29.** Точность замера уровней при глубине уровня до 10 м должна составлять 10 мм, а при глубине свыше 10 м — 0,1 % (ГОСТ 23278—78).

Наибольшие ошибки в замерах уровней дают полотняные рулетки, шпагат, при глубине уровня до 10—15 м погрешность составляет 5 %.

Использование хлопушек с утяжеленным весом влечет за собой ошибки 2—3 % при глубине уровня до 20 м.

**1.30.** На погрешность при определении дебита влияет форма емкостей; наибольшая погрешность получается при использовании емкостей с небольшим основанием и значительной высотой за счет высоких скоростей подъема уровня в емкости.

На точность замера дебита также влияет высота волны в мерной емкости. Для исключения этого влияния необходимо в мерной емкости устанавливать «успокоитель» — доску или круг.

Точность определения дебита водосливом значительно выше, чем мерной емкостью.

**1.31.** Значительные ошибки в определении дебита возникают при пульсирующем режиме откачки (например, при работе эрлифта или при откачке «на храп»). При этом величина ошибки возрастает пропорционально увеличению периода пульсации. В этом случае для уменьшения ошибок необходимо замеры дебита проводить с учетом режима пульсации, отсчитывая время наполнения мерной емкости соответственно длительности периода пульсации.

На результаты откачек также влияет пескование скважины, что является следствием неправильного подбора или установки фильтра, его повреждения или неудовлетворительной подготовкой скважины. Для исключения этого влияния рекомендуется уменьшить дебит или спустить в скважину второй фильтр (если позволяет диаметр первого фильтра).

**1.32.** Достоверность определения гидрогеологических параметров определяется правильностью выбора схемы опробования, обработки и интерпретации результатов испытания.

При стационарном режиме фильтрации расчет коэффициента фильтрации сопровождается погрешностью за счет принятия ориентировочного значения радиуса влияния. Погрешность определения коэффициента фильтрации при кустовой схеме испытания зависит от расстояния наблюдательных скважин от центральных и взаимного расположения наблюдательных скважин. Для исключения ошибок не рекомендуется первую наблюдательную скважину задавать в зоне 0,1—0,15 $R_п$ ($R_п$ — радиус влия-

Таблица 1

| Коэффициент линейной корреляции[1] $r$ | Необходимое число измерений уровней при величине относительной ошибки $\varepsilon_в$, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 0,95 | 47 | 15 | 8 | 6 | 6 |
| 0,96 | 37 | 13 | 8 | 6 | 6 |
| 0,97 | 29 | 11 | 7 | 6 | 5 |
| 0,98 | 20 | 9 | 6 | 5 | 4 |
| 0,99 | 12 | 6 | 5 | 4 | 4 |

[1] При отсутствии необходимых данных можно задавать ориентировочное значение $r$, которое должно быть не менее 0,95.

ния) от центральной скважины.

При нестационарном режиме диагностика результатов откачки из одиночной скважины не может быть надежной в силу причин, изложенных в п. 1.24, которые влияют на форму графика $S=f(\lg t)$. Выделение представительного участка графика одиночной откачки весьма затруднительно, особенно при откачках из несовершенных скважин. Относительно надежную информацию о проводимости пласта при одиночном опробовании можно получить по данным восстановления уровня, при наличии достаточно представительного участка графика $S=f(\lg t)$.

При кустовой схеме испытания основное значение для надежности получения гидрогеологических параметров имеет правильный выбор представительного участка индикаторных графиков. При построении графиков необходимо отбраковывать отдельные точки или перестраивать графики с учетом влияния на них искажающих факторов.

Точность определения водопроводимости при графоаналитическом способе обработки можно определить, исходя из необходимого числа опытных точек на индикаторном графике [27] по формуле

$$n = 2 + \left(1 - r^2\right) t_{qk}^2 / \varepsilon_в^2 r^2, \qquad (5)$$

где $n$ — число опытных точек на графике; $r$ — коэффициент линейной корреляции; $\varepsilon_в$ — относительная ошибка в определении углового коэффициента; $t_{qk}^2$ — показатель вероятности.

Оптимальное число точек измерения уровня в зависимости от заданной вероятности (0,95) и относительной ошибки (точности определения водопроводимости) можно получить из табл. 1.

## Схематизация природных условий

**1.33.** Все гидрогеологические расчеты, основанные на применении дифференциальных уравнений математической физики, в том числе и расчеты параметров водопроницаемости по данным откачек из скважин, выполнимы при условии идеализации природной обстановки, схематизации фильтрационных процессов.

**1.34.** Схематизация производится по ряду природных факторов: гидродинамического режима пласта, характера его строения и граничных условий в разрезе и плане. Кроме того, в расчетной схеме необходимо учитывать характер вскрытия водоносного пласта скважинами.

**1.35.** По гидродинамическому режиму водоносные пласты разделяются на два основных типа: напорные, безнапорные.

**1.36.** По характеру строения водоносные пласты подразделяются на четыре группы:

пласт однородный или однородно-анизотропный;

пласт двухслойный с горизонтальной границей между слоями;

пласт трехслойный и многослойный с горизонтальными границами между слоями;

пласты, проницаемость пород которых не подчиняется определенной закономерности — анизотропные, трещинные и трещинно-карстовые.

**1.37.** В зависимости от граничных условий в разрезе водоносные пласты могут быть: ограниченные — ограничены сверху и снизу водонепроницаемыми породами или водоупором снизу и свободной поверхностью сверху; полуограниченные — имеющие водоупор или свободную поверхность сверху и условно безграничные снизу; неограниченные — частный случай полуограниченных пластов, когда по условиям опробования можно условно принять их безграничными.

**1.38.** По характеру границ области фильтрации в плане различаются неограниченные, полуограниченные и ограниченные пласты.

По гидродинамическим условиям на этих границах выделяются границы с постоянным напором $H=\text{const}$, границы с постоянным расходом $q=\text{const}$, непроницаемые границы $q=0$.

**1.39.** По характеру вскрытия водоносного пласта выделяются скважины совершенные и несовершенные. Степень вскрытия возмущающей скважиной водоносного пласта существенно определяет структуру фильтрационного потока при откачке и схему интерпретации результатов испытания.

Влияние несовершенства наблюдательных скважин, особенно расположенных вблизи от возмущающей, должно учитываться при интерпретации данных откачки. Это влияние можно не учитывать

при соблюдении условий расположения фильтров, изложенных в разд. 2.

## 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОТКАЧЕК

### Выбор местоположения и схемы проведения испытаний

**2.1.** Местоположение пунктов испытаний, выбор технологической схемы и схемы опытного куста (при проведении кустовой откачки) следует определять в программе изысканий (проекте) в зависимости от целевого назначения откачки, стадии работ, с учетом инженерно-геологических и гидрогеологических условий участка исследований (ГОСТ 23278—78).

**2.2.** В целях наиболее рационального расположения опытных скважин и особенно опытных кустов до составления программы (проекта) работ должны быть изучены все имеющиеся по району геологические, геоморфологические и гидрогеологические материалы, включающие разрезы буровых скважин, результаты опытно-фильтрационных и геофизических исследований, данные гидрогеологических наблюдений и опытов, проводимых в процессе бурения (экспресс-опробования), результаты лабораторных определений физико-механических свойств грунтов и пр.

**2.3.** При размещении скважин (кустов скважин), предназначенных для проведения откачек, в общем случае необходимо избегать участки, где резко меняется мощность и водопроницаемость водоносного слоя. Скважины или кусты скважин следует располагать в наиболее характерных местах тех участков или слоев (комплексов, горизонтов), изучение которых необходимо для проектирования сооружений, мероприятий по защите территорий или водоносных горизонтов (комплексов) от нежелательных явлений или для оценки запасов подземных вод.

Во всех случаях расположение и схему проведения испытания необходимо увязывать с расположением и характером работы проектируемого сооружения.

**2.4.** При выборе местоположения опытных скважин (кустов скважин) следует учитывать положение границ водоносного пласта. Наилучшие результаты при определении фильтрационных свойств пласта дают, как правило, откачки, в процессе ведения которых на получаемые опытные закономерности понижений уровня подземных вод не накладывается влияние его границ.

Влиянием границ, независимо от их природы, можно пренебречь при $t > t_к$ и, если дальняя наблюдательная скважина расположена на расстоянии $r \leqslant 0{,}5L$ (где $L$ — расстояние до границы, $t_к$ — контрольное время, $t_к = r^2/0{,}4a$, $r$ — расстояние от возмущаю-

щей до наблюдательной скважины, $a$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности). Если известна конфигурация границы, то допустимо $r \leqslant 0{,}6L$ — в параллельном луче и $r \leqslant 0{,}8\,L$ — во внутреннем луче.

В неограниченных пластах плановое положение одиночных и кустов скважин не имеет значения.

Для изучения влияния граничных условий пластов местоположение опытных кустов должно быть приближено к границам, а схема опытного куста должна определяться целевым назначением испытания.

2.5. Откачки вблизи поверхностных водотоков или водоемов (рек, каналов, водохранилищ и т. п.) характеризуются рядом особенностей, которые необходимо учитывать при постановке, проведении и обработке результатов опытных работ.

Определение гидрогеологических параметров по данным кустовых откачек вблизи поверхностных водотоков (водоемов) производится на основе аналитических решений задач о притоке подземных вод к скважине, работающей в полубесконечном по площади распространения пласте, границей которого является прямолинейный контур водотока (водоема). Поэтому местоположение опытного куста скважин следует выбирать таким образом, чтобы линия уреза водотока (водоема) в зоне влияния откачки была по форме как можно ближе к прямолинейной. Однако это условие не всегда согласуется с расположением проектируемых зданий и сооружений. В том случае, когда опытные кусты приходится размещать вблизи сугубо криволинейных береговых участков, определение гидрогеологических параметров рекомендуется производить путем решения обратной задачи методом моделирования на АВМ (или ЭВМ).

2.6. Схема опытного куста должна обеспечить возможность определения необходимых гидрогеологических параметров и достаточную точность выполняемых расчетов. Она должна отвечать предполагаемому методу интерпретации.

Схема включает обоснование количества возмущающих и наблюдательных скважин, их взаимное расположение в плане и разрезе и должна обеспечивать (при рациональной длительности откачки) представительный охват области депрессии, а также необходимую величину разности понижений уровня воды в соседних наблюдательных скважинах и величины понижений уровня воды в удаленных наблюдательных скважинах (составляющей не менее 20—30 см).

Схема опытного куста, организуемого для изучения граничных условий, кроме того, должна обеспечить получение необходимых данных для оценки влияния исследуемых границ.

2.7. Количество опытных (возмущающих) скважин может изменяться от одной до трех и более и определяется необходимой степенью возмущения, способного обеспечить необходимую величину понижения в дальних наблюдательных скважинах и разницу между понижениями в соседних.

В случае использования нескольких возмущающих скважин необходимо стремиться к максимальной компактности их размещения, с целью возможности отнесения суммарного дебита всей системы скважин к одной (наиболее нагруженной) скважине. Расстояние между возмущающими скважинами такой группы не должно превышать в напорных водах $0{,}5\,r_1$ ($r_1$ — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины), в безнапорных — $0{,}3r_1$.

2.8. Количество и размещение наблюдательных скважин в кусте определяется гидрогеологическими условиями пласта:

степенью однородности пласта (однородный, неоднородный, весьма неоднородный);

гидравлическим типом пласта (напорный, безнапорный);

глубиной залегания и мощностью водоносного горизонта;

граничными условиями пласта.

Схема опытного куста также зависит от метода расчета, принятой расчетной схемы и стадии исследований.

2.9. Количество наблюдательных скважин в кусте должно обеспечить возможность осреднения и контроля получаемых величин и определяется, главным образом, степенью неоднородности опробуемых пород. Минимальное количество наблюдательных скважин должно быть не менее трех. Допускается в однородных пластах назначать две наблюдательные скважины. Оптимальное количество наблюдательных скважин составляет 6—7.

2.10. Назначение необходимого количества наблюдательных скважин больше минимального зависит:

от степени сложности интерпретации данных откачки;

от назначения кустовой откачки;

от глубины залегания водоносного горизонта.

Во всех случаях необходимо в качестве наблюдательных использовать разведочные скважины и скважины иного назначения.

2.11. Сложноинтерпретируемыми являются такие результаты откачек, когда представительные участки графиков прослеживания формируются с запаздыванием, при этом факт и величина запаздывания часто непрогнозируемы.

К сложноинтерпретируемым относятся испытания в поровых безнапорных водоносных горизонтах, в напорных и безнапорных водоносных горизонтах трещинных и трещинно-карстовых зон, в слоистых толщах, особенно при отсутствии разделяющих слабопроницаемых прослоев.

2.12. Количество наблюдательных скважин при использовании гидродинамического метода расчетов должно быть больше, а при гидравлическом методе расчетов — меньше.

Количество наблюдательных скважин также зависит и от решаемой задачи. Например, количество наблюдательных скважин в кусте должно быть больше при необходимости проведения расчетов подпора и подтопления территории во времени, чем при оценке только водопритока в строительный котлован и т. д. Кроме того, максимальное количество наблюдательных скважин обычно предусматривается, когда куст размещается непосредственно в пределах контуров крупных промышленных и гидротехнических сооружений, мелиорируемых и защищаемых территорий, водозаборов и др. При изысканиях для гражданских и линейных сооружений количество наблюдательных скважин должно быть минимальным. При больших глубинах залегания изучаемого пласта количество наблюдательных скважин не должно превышать минимального количества для данных гидрогеологических условий.

2.13. При определении гидрогеологических параметров, а также изучении граничных условий пласта следует придерживаться лучевой схемы размещения наблюдательных скважин. Направление и количество лучей задаются, исходя из конкретных геолого-гидрогеологических условий, задач, решаемых откачкой, и принятой расчетной схемы.

Однолучевые кусты задаются в относительно однородных пластах на удалении от границ для изучения параметров водопроницаемости. В анизотропных и в ограниченных пластах следует назначать двухлучевые кусты.

2.14. Наблюдательные скважины следует размещать по правилам геометрической прогрессии, так как для получения представительных графиков площадного прослеживания расстояния наблюдательных скважин от возмущающих должны обеспечить получение равномерно распределенных точек в логарифмическом масштабе.

Расстояние от возмущающей до соответствующей наблюдательной скважины $r_n$ независимо от количества лучей и их ориентировки может быть определено по следующей полуэмпирической формуле Б. Г. Самсонова

$$r_n \approx r_1 \alpha^{n-1}, \qquad (6)$$

где $r_1$ — расстояние от опытной до ближайшей наблюдательной скважины; $\alpha$ — эмпирический коэффициент, принимаемый для безнапорных горизонтов равным 1,5, для напорных — 2,5; $n$ — порядковый номер наблюдательной скважины.

Нумерация производится в возрастающем порядке в направлении от опытной скважины, причем в одном луче располагаются

скважины с нечетными номерами, а в другом — с четными. При однолучевом кусте скважинам присваиваются нечетные номера. При наличии трех или четырех лучей в третьем помещают скважины с последующими нечетными номерами, а в четвертом — с последующими четными.

2.15. Расстояние от первой наблюдательной скважины до возмущающей рекомендуется принимать равным $r_1 \approx (0{,}7—1{,}0)m$, а расстояние до наиболее удаленной наблюдательной скважины в безнапорных пластах ~150 м, в напорных ~1500 м, что позволит при понижениях в возмущающих скважинах 3—4 м и длительности откачки порядка 10 суток охватить наблюдениями участок в пределах воронки депрессии.

При этом скважины могут быть как совершенные, так и несовершенные. В случае когда расстояние первой наблюдательной скважины от возмущающей меньше указанной выше величины, следует устраивать в кусте совершенные скважины (при мощности пласта не более 15—20 м, а при изысканиях для целей водоснабжения — не более 50 м), особенно при изучении анизотропных или неоднородных пластов.

Расстояния от наблюдательных скважин до опытной корректируются по результатам прокачки или пробной откачки, проводящейся после размещения одной или нескольких первоочередных наблюдательных скважин на одном из лучей.

### Откачки в условиях однородных водоносных пластов (горизонтов)

2.16. Опытные откачки из одиночных скважин в условиях однородных напорных и безнапорных пластов для определения коэффициента фильтрации целесообразно проводить в случаях, когда технология проходки скважины позволяет получить прифильтровые зоны хорошего качества. Результаты опытных откачек из одиночных скважин рекомендуется коррелировать с результатами кустовой откачки.

2.17. При кустовых откачках в неограниченных однородных пластах для определения гидрогеологических параметров рекомендуется задавать один луч. Направление луча может быть принято любое. Число наблюдательных скважин на луче рекомендуется принимать 2—3 с учетом требований, изложенных в пп. 2.8, 2.10 и 2.12. Расстояния наблюдательных скважин от возмущающей принимаются исходя из условий, изложенных в пп. 2.14, 2.15.

2.18. При кустовых откачках вблизи границ пласта наблюдательные скважины располагаются по двум лучам — параллельно и перпендикулярно границе. Допускается задавать один луч, парал-

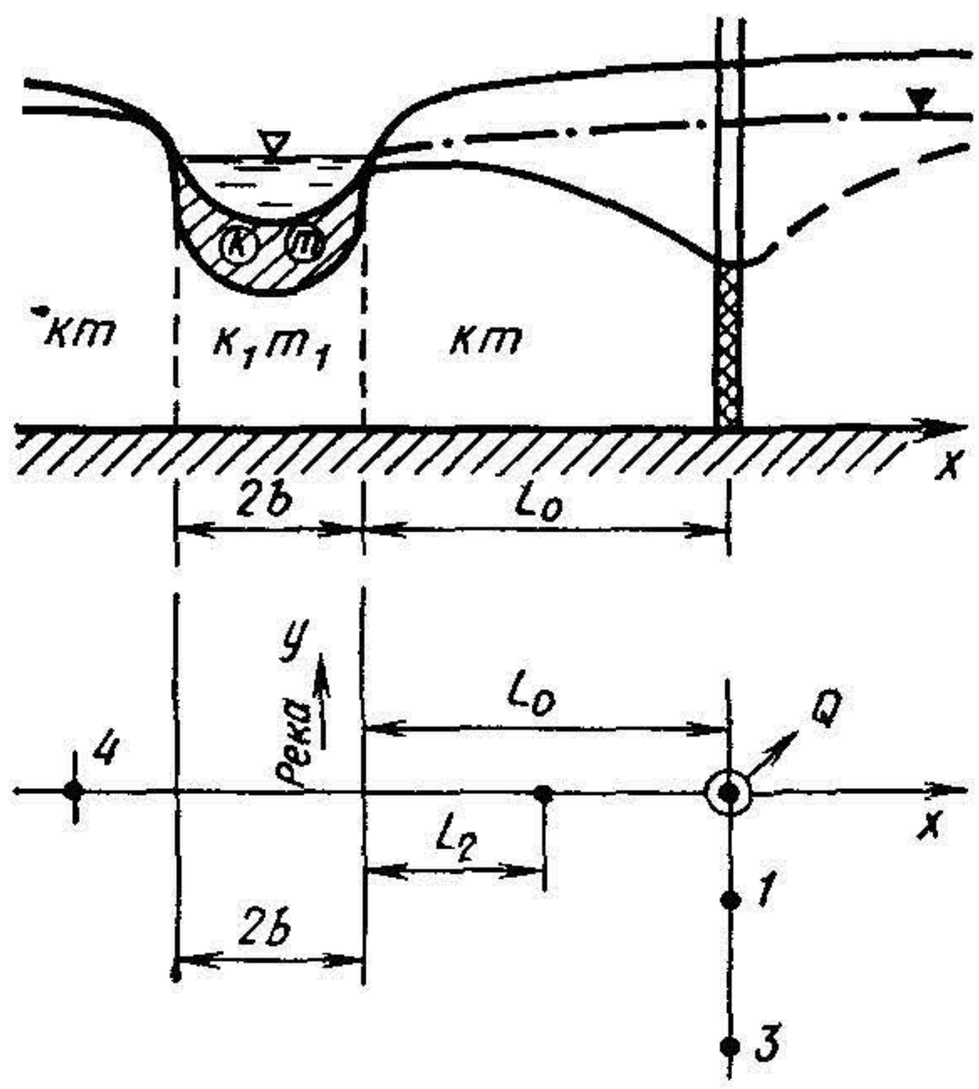



Рис. 3. Схема расположения скважин при кустовой откачке вблизи несовершенной реки

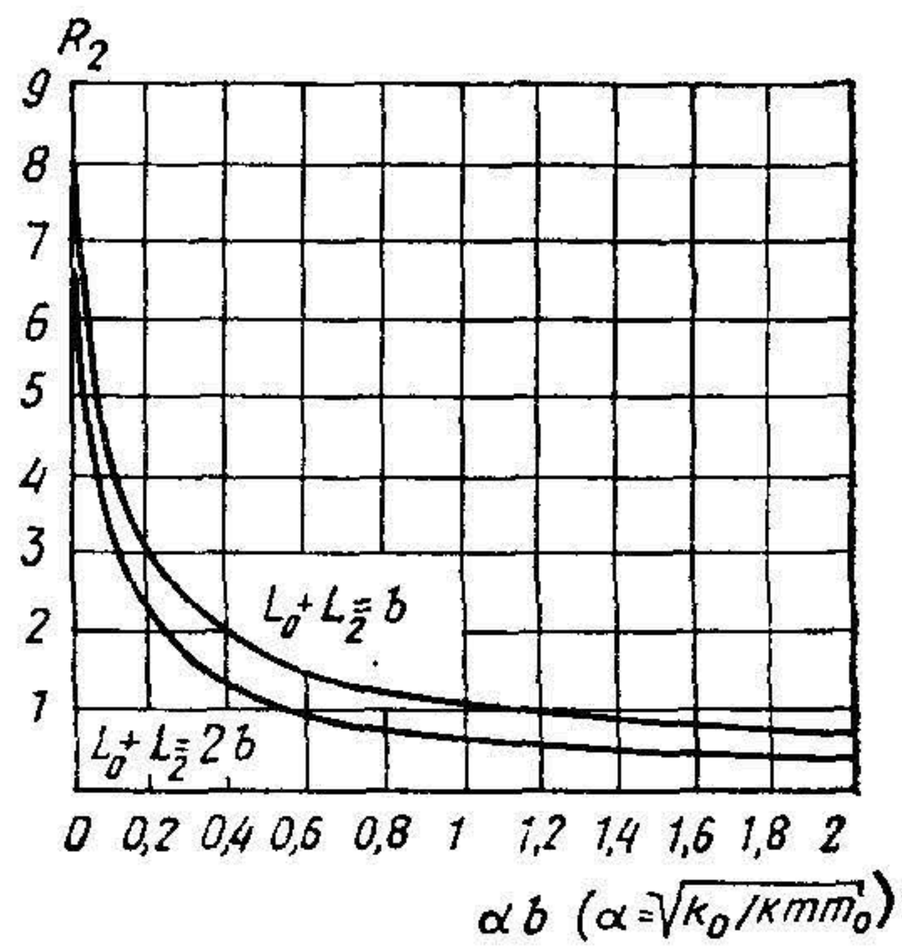



Рис. 4. График для определения параметра несовершенства водотока (водоема) при его ширине $2b<30$—50 м ($2b$ — ширина)

$R_2$—дополнительное сопротивление; $\alpha=1/\Delta L$

лельный границе. По этому лучу определяется водопроводимость. Для изучения влияния этой границы луч задается перпендикулярно границе (встречный), а если это влияние нежелательно, то луч задается от границы (внутренний).

Число наблюдательных скважин должно быть: две — для напорных пластов и две-три — для безнапорных.

Расстояния от возмущающей до наблюдательных скважин принимаются в соответствии с п. 2.14. При этом расстояние до дальней наблюдательной скважины в параллельном границе луче не должно превышать расстояния до границы пласта.

**2.19.** При откачках у водотока (водоема) для оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод и определения водопроводимости пласта центральную скважину следует располагать недалеко от уреза водотока (водоема), но не ближе, чем на расстоянии, равном 2—3 мощностям опробуемого пласта, а наблюдательные скважины по двум лучам — параллельно и нормально урезу (по направлению к нему).

На параллельном луче оборудуются 2—3 наблюдательные скважины, которые используются для определения водопроводимости пласта. Расстояния между центральной и наблюдательными скважинами могут определяться по формуле (6), но при этом рекомендуется, чтобы расстояние до дальней наблюдательной скважи-

ны не превышало 0,7 расстояния от центральной скважины до водотока (водоема), а расстояние от центральной до ближней наблюдательной должно быть не менее 0,7 мощности пласта.

На перпендикулярном к урезу луче также оборудуются 2—3 наблюдательные скважины, используемые для определения параметра несовершенства ложа водотока (водоема). Наблюдательные скважины располагаются (рис. 3) на расстоянии $0{,}5L_0$ ($L_0$ — расстояние от уреза до центральной скважины), вблизи уреза (но не ближе половины мощности пласта) и по возможности на урезе водотока (водоема).

При небольшой ширине водотока ($2b<30$—50 м), когда центральная и наблюдательная скважины в створе, перпендикулярном водотоку, расположены так, что сумма их расстояний от уреза $L_0+L_2$ равна либо $b$, либо $2b$, тогда параметр несовершенства ложа водотока можно определить по графикам (рис. 4).

На узких водотоках целесообразно также закладывать наблюдательные скважины на противоположном по отношению к центральной скважине берегу (см. рис. 3).

Для оконтуривания воронки депрессии рекомендуется задавать третий луч от центральной скважины в сторону, противоположную водотоку (реке), на котором следует располагать одну наблюдательную скважину на расстоянии, равном расстоянию центральной скважины до водотока.

2.20. Возмущающие и наблюдательные скважины по степени вскрытия водоносного пласта должны быть совершенными при мощности пласта до 15—20 м. При бóльшей мощности пласта это требование не обязательно. Деформирующее влияние несовершенства скважин на закономерности изменения уровня следует устранять соответствующим размещением наблюдательных скважин в плане и их фильтров в разрезе относительно возмущающих скважин. При этом в изотропных толщах длина фильтра возмущающей скважины не должна быть меньше 2,5—3 м, длина фильтров наблюдательных скважин, как правило, должна быть равна фильтру возмущающей скважины (при небольшой его длине); все фильтры должны быть установлены в одной плоскости. В случае когда длина фильтра наблюдательной скважины меньше длины фильтра возмущающей скважины, его следует устанавливать на уровне средней части фильтра центральной скважины (см. п. 1.27).

2.21. При откачке из безнапорного водоносного горизонта рекомендуется фильтр возмущающей скважины устанавливать ниже уровня грунтовых вод, глубина до верхнего конца фильтра должна быть примерно равной его длине, что повышает точность определения гидрогеологических параметров по соответствующим формулам для напорного пласта (при условии, когда величина пони-

жения в центральной скважине не провышает 15—20 % мощности водоносного пласта).

2.22. В речных долинах с водоносными горизонтами большой мощности для оценки анизотропии пласта наблюдательные скважины оборудуются в виде кустов на разные глубины водоносного горизонта (например, в трех интервалах: верх водоносного горизонта, середина и низ). Кроме того, устанавливаются наблюдательные скважины на урезе реки и в русле — ниже уровня подземных вод на 2—3 м.

### Откачки в условиях неоднородных неограниченных и ограниченных в разрезе пластов

2.23. Определение параметров водопроницаемости неоднородных толщ может производиться одиночными и кустовыми откачками.

2.24. Откачки из одиночных скважин для определения коэффициента фильтрации рекомендуется производить совместно с геофизическими методами — расходометрией, резистивиметрией и др. При проведении откачек из одиночных скважин необходимо предусматривать методику проходки скважин, а также тип и конструкцию фильтра таковыми, чтобы максимально уменьшить сопротивление прифильтровой зоны и самого фильтра.

2.25. Для проведения кустовой откачки в слоистой толще необходимо прежде всего выполнить обоснование расчетной схемы, построение которой должно корректироваться в процессе опыта. При отсутствии такой схемы обработка опытных данных практически невозможна.

Учитывая разнообразие природных условий, для опробования неоднородных толщ рекомендуется придерживаться типовых схем размещения опытных и наблюдательных скважин.

2.26. При постепенном изменении водопроницаемости водоносного пласта в вертикальном направлении, когда выделение границ отдельных слоев затруднено, производятся суммарные и зональные откачки из одиночных и кустовых скважин. В пластах небольшой мощности до 15—20 м обычно опробуются два интервала, примыкающие к подошве и кровле водоносного пласта (в безнапорных водах — к статическому уровню). При большой мощности водоносного пласта рекомендуется опробовать зоны мощностью не более 10 м, сверху — вниз по мере проходки скважины. В этом случае при кустовых откачках сначала проходится первая наблюдательная скважина, по которой корректируются конструкция и опробуемые интервалы центральной скважины.

2.27. В слоистых пластах, имеющих четкие границы или разде-

ленных малопроницаемыми прослоями, проводятся одиночные и кустовые откачки как из совершенных, так и несовершенных скважин. В случае раздельного опробования слоев многослойной толщи конструкции скважин должны обеспечивать надежное определение гидрогеологических параметров изучаемого слоя.

2.28. Число наблюдательных скважин в луче рекомендуется не менее 4, а для получения только коэффициента фильтрации или водопроводимости допускается иметь на луче 2—3 скважины.

В весьма неоднородных пластах допускается число скважин в кусте доводить до 10. При назначении числа лучей и количества скважин в неограниченных неоднородных пластах следует руководствоваться пп. 2.9.—2.15.

2.29. Размещать наблюдательные скважины при раздельном опробовании слоев в случае перетока из контактируемых слоев рекомендуется аналогично кустам в безнапорном пласте.

В случае суммарного опробования слоистых толщ, при наличии водоупорного верхнего слоя и при понижении, не превышающем пьезометрический напор, наблюдательные скважины размещаются как в напорном однородном пласте.

Если же верхний водоупор отсутствует, а опытное понижение меньше (или равно) мощности верхнего слоя водоносной толщи, то наблюдательные скважины следует размещать как в безнапорном пласте.

а) Двухслойные пласты

2.30. При двухслойном строении водоносной толщи, когда мощность обоих слоев ограничена и водопроницаемость нижнего контактирующего слоя значительно превышает водопроницаемость верхнего (в 10 раз и более), а водоносный горизонт имеет свободную поверхность, определение гидрогеологических параметров нижнего слоя производится одиночными или кустовыми откачками из совершенных скважин с фильтрами в нижнем слое.

При проведении кустовых откачек наблюдательные скважины должны быть оборудованы как в нижнем, так и в верхнем слабофильтрующем слое (рис. 5).

Фильтр в верхнем слое заглубляется под уровень грунтовых вод, а глубина верхнего конца фильтра должна быть не менее длины фильтра (скважина не должна прорезать верхний слой).

2.31. В двухслойной водоносной толще с двумя контактирующими полуограниченными слоями разной проницаемости (рис. 6) рекомендуется фильтры центральной и наблюдательной скважин устанавливать в половине опробуемого слоя, примыкающей к границе между слоями.

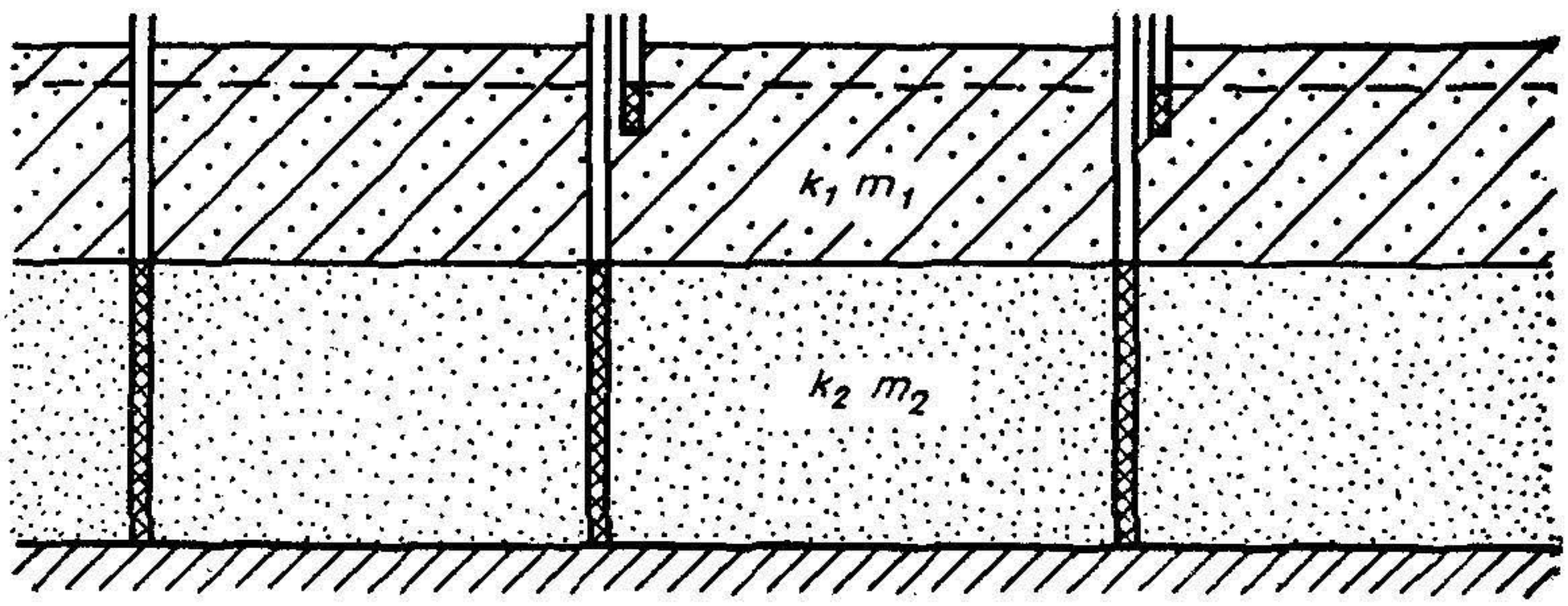



Рис. 5. Схема двухслойной толщи с ограниченной мощностью обоих слоев (пласт безнапорный)

$k_1 < k_2$

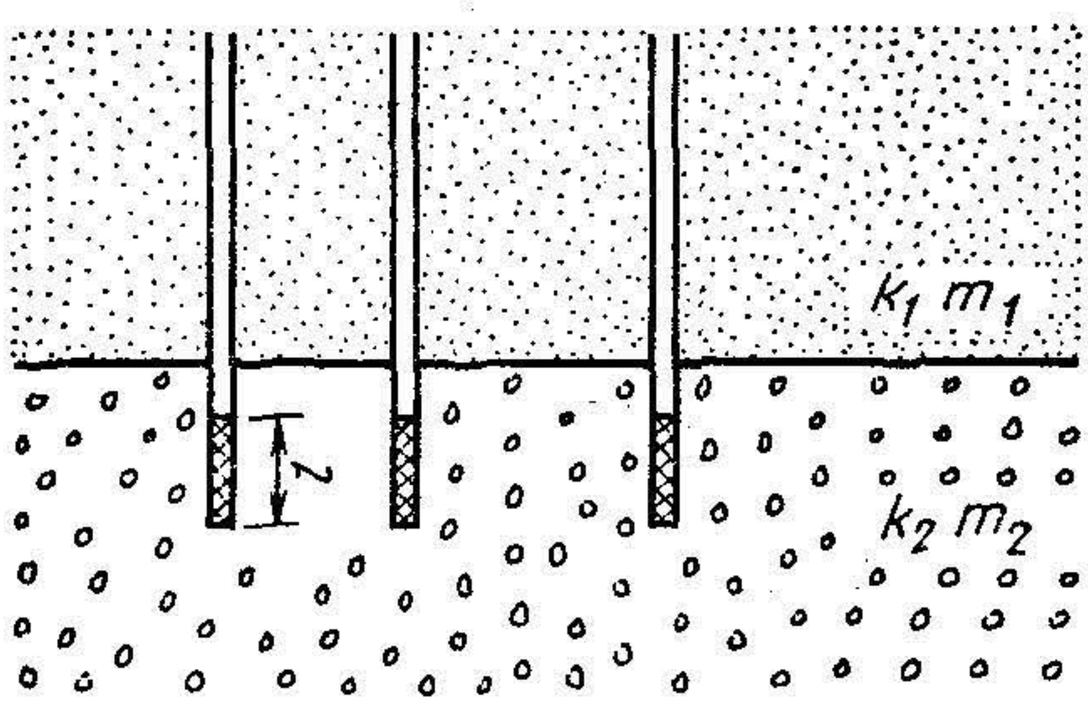



Рис. 6. Схема двухслойной толщи с двумя контактирующими полуограниченными слоями

$k_1 \neq k_2$, $l \leqslant 1/3 m_2$

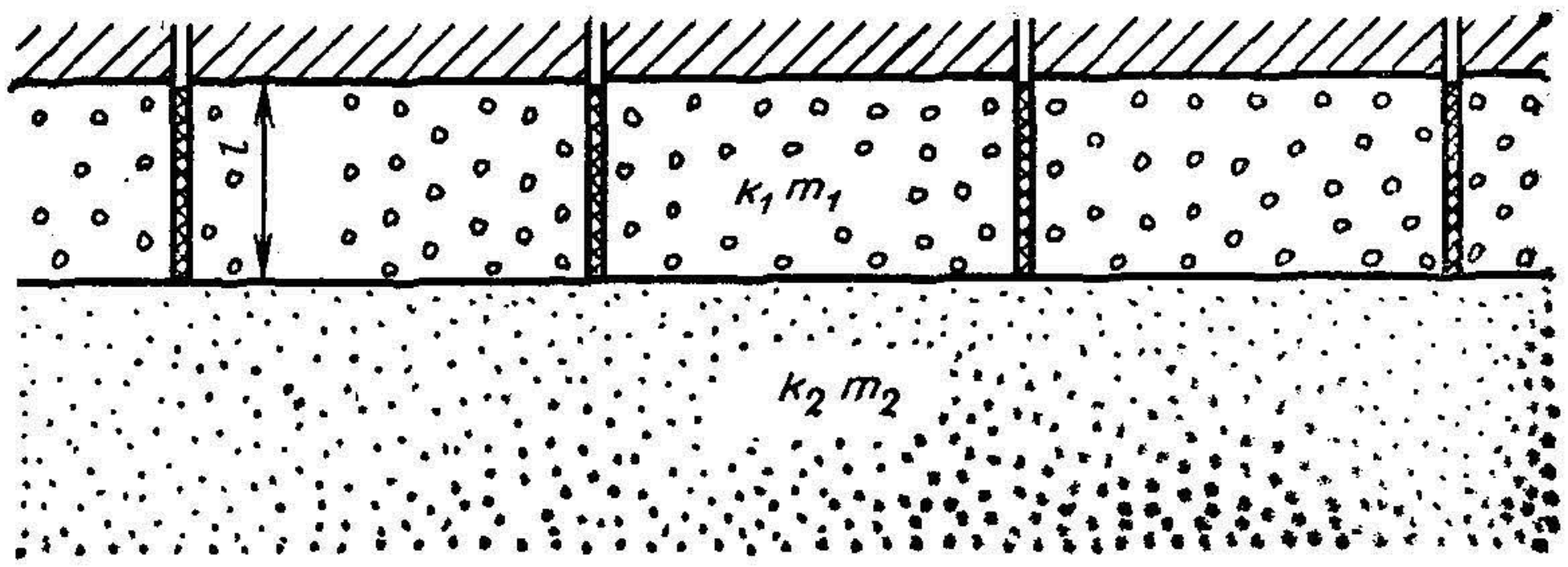



Рис. 7. Схема двухслойной толщи (пласт с поверхности ограничен водоупором или свободной поверхностью)

$m_2/m_1 > 2-3$, $l = m_1$

Длина фильтров должна быть не более $^1/_3$ мощности опробуемого слоя, при этом длина фильтров наблюдательных скважин должна быть равной длине фильтра центральной скважины.

Расстояние от первой наблюдательной скважины до центральной рекомендуется принимать равным $^1/_3$ мощности опробуемого

слоя. При такой схеме расчет коэффициента фильтрации может производиться по формулам установившегося движения [5].

2.32. В случае когда мощность нижнего контактирующего слоя двухслойной водоносной толщи в 2—3 раза более мощности верхнего слоя, а водоносная толща ограничена сверху водоупором или свободной поверхностью (рис. 7), для определения гидрогеологических параметров верхнего слоя (ограниченного) фильтры, как правило, должны быть равны его мощности. Число наблюдательных скважин должно быть не менее 3.

Расстояние от первой наблюдательной скважины до центральной рекомендуется устанавливать равным половине общей мощности водоносной толщи, а от второй — примерно равным суммарной мощности всей водоносной толщи [5].

По результатам откачек из верхнего слоя, когда его водопроницаемость в 20—30 раз выше нижнего слоя, можно определить коэффициент фильтрации и нижнего слоя при условии, что наблюдательные скважины достаточно далеко отдалены от центральной. Расстояние до дальней скважины должно в несколько раз превышать мощность верхнего слоя, а отношение расстояния второй наблюдательной скважины к первой должно быть в пределах 5—10 (чем меньше коэффициент фильтрации нижнего слоя, тем больше должна быть величина отношения).

В случае когда нижний слой более проницаемый, при определении водопроницаемости толщи фильтры центральной и наблюдательных скважин рекомендуется располагать в верхней половине нижнего слоя (рис 8). Расстояние до первой наблюдательной скважины рекомендуется принимать равным примерно половине мощности нижнего слоя. В этом случае можно определить коэффициент фильтрации нижнего (опробуемого) слоя и путем подбора по формулам В. Д. Бабушкина — верхнего слоя [5].

Расчеты по вышеуказанным схемам производятся по формулам установившегося движения.

2.33. При откачаках вблизи реки при двухслойном строении водоносной толщи, когда опробуется нижний более водопроницаемый слой, наблюдательные скважины оборудуются на оба слоя. При этом одна наблюдательная скважина на верхний водоносный горизонт должна быть оборудована рядом с центральной скважиной.

Расположение лучей принимается в сответтствии с п. 2.19.

При определении коэффициента фильтрации раздельно нижнего или верхнего слоя, когда мощность нижнего слоя в 2—3 раза превышает мощность верхнего, расстояния наблюдательных скважин, а также расположение фильтров рекомендуется принимать в соответствии с п. 2.31, причем для определения фильтрационных

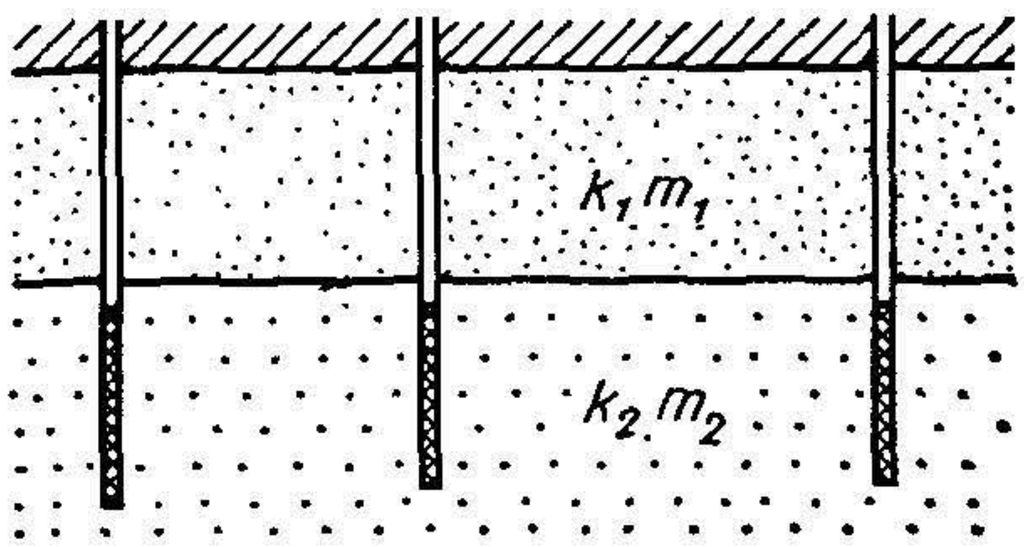



Рис. 8. Схема двухслойной толщи (пласт ограничен водоупором или свободной поверхностью)

$m_2/m_1 \geqslant 2—3$, $k_2 > k_1$

параметров верхнего слоя куст скважин должен отстоять от реки не более чем на половину общей мощности водоносной толщи.

В случае когда мощности обоих слоев ограничены и проницаемость нижнего слоя значительно превышает проницаемость верхнего, рекомендуется скважины принимать совершенными; для определения фильтрационных параметров обоих слоев рекомендуется на луче иметь не менее четырех наблюдательных скважин (в нижнем слое), причем две ближайшие из них должны располагаться на расстоянии до (1—1,5) $m_2$ от центральной, третья — на расстоянии (3—5) $m_2$ и четвертая — (8—10) $m_2$, где $m_2$ — мощность нижнего слоя.

Данные двух ближайших наблюдательных скважин служат для определения коэффициента фильтрации нижнего слоя, а по двум дальним скважинам — для расчета коэффициента фильтрации верхнего слоя и параметра перетекания.

б) Трехслойные толщи

**2.34.** В трехслойной толще, когда средний слой обладает меньшей водопроницаемостью по сравнению с верхним и нижним, а крайние слои можно рассматривать как полуограниченные, опытный куст должен быть оборудован не менее чем четырьмя наблюдательными скважинами, из которых фильтры двух располагаются в опробуемом откачкой слое, а двух других — рядом, но в другом относительно хорошо водопроницаемом слое. Фильтры центральной и наблюдательных скважин рекомендуется располагать вблизи границ среднего слоя, длина их не должна превышать мощности хорошо проницаемого слоя, из которого ведется откачка. Расстояния от наблюдательных скважин до центральной не должны превышать половины мощности слоя, из которого ведется откачка (рис. 9).

В случае когда средний слой обладает более высокой водопроницаемостью по сравнению с верхним и нижним (полуограниченными), число наблюдательных скважин на луче должно быть не менее 3, а фильтры установлены в среднем слое. Их длина в этом

случае не должна превышать мощности среднего слоя и при этом половины мощности каждого из крайних слоев. Рядом с наблюдательными скажинами на проницаемый слой, из которого ведется откачка, рекомендуется оборудовать наблюдательные скважины на верхний слой (или на верхний и нижний); данные наблюдений

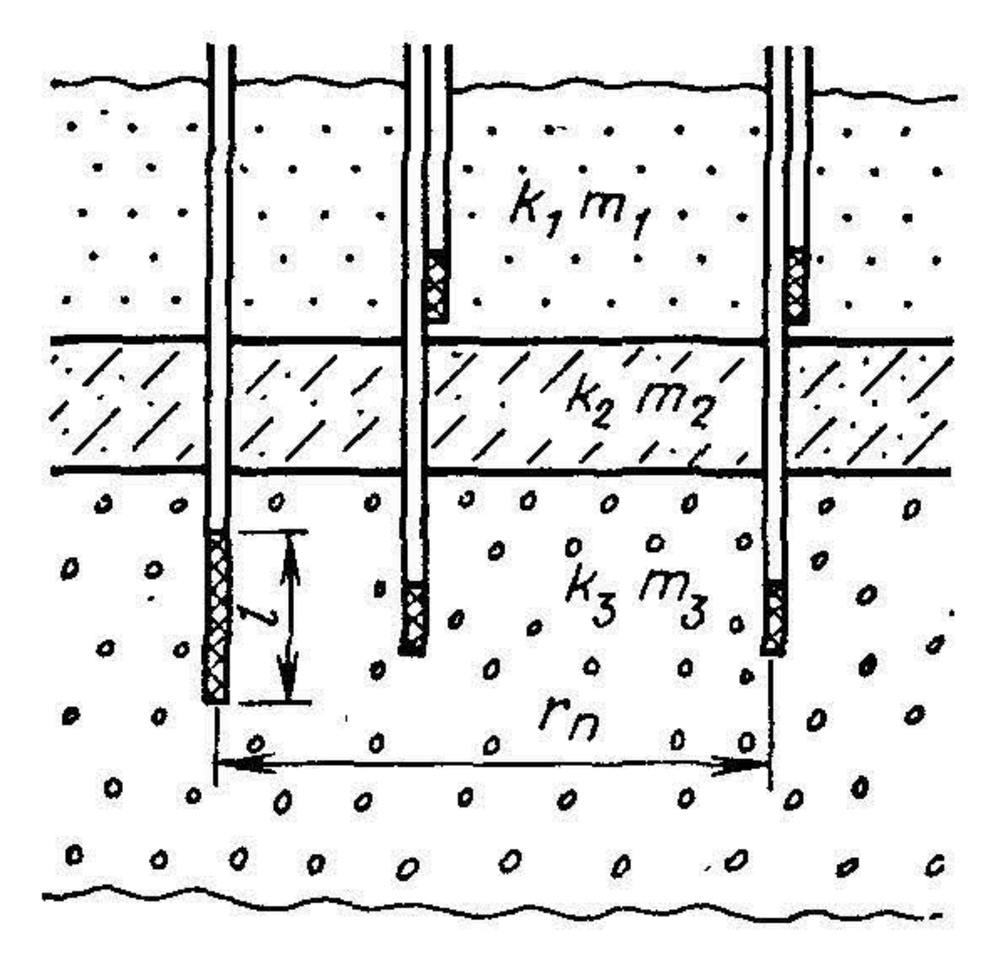



Рис. 9. Схема трехслойной толщи (крайние слои полуограниченные)

$k_1 > k_2 < k_3$, $l < m_3$, $r_n \leqslant m_3$

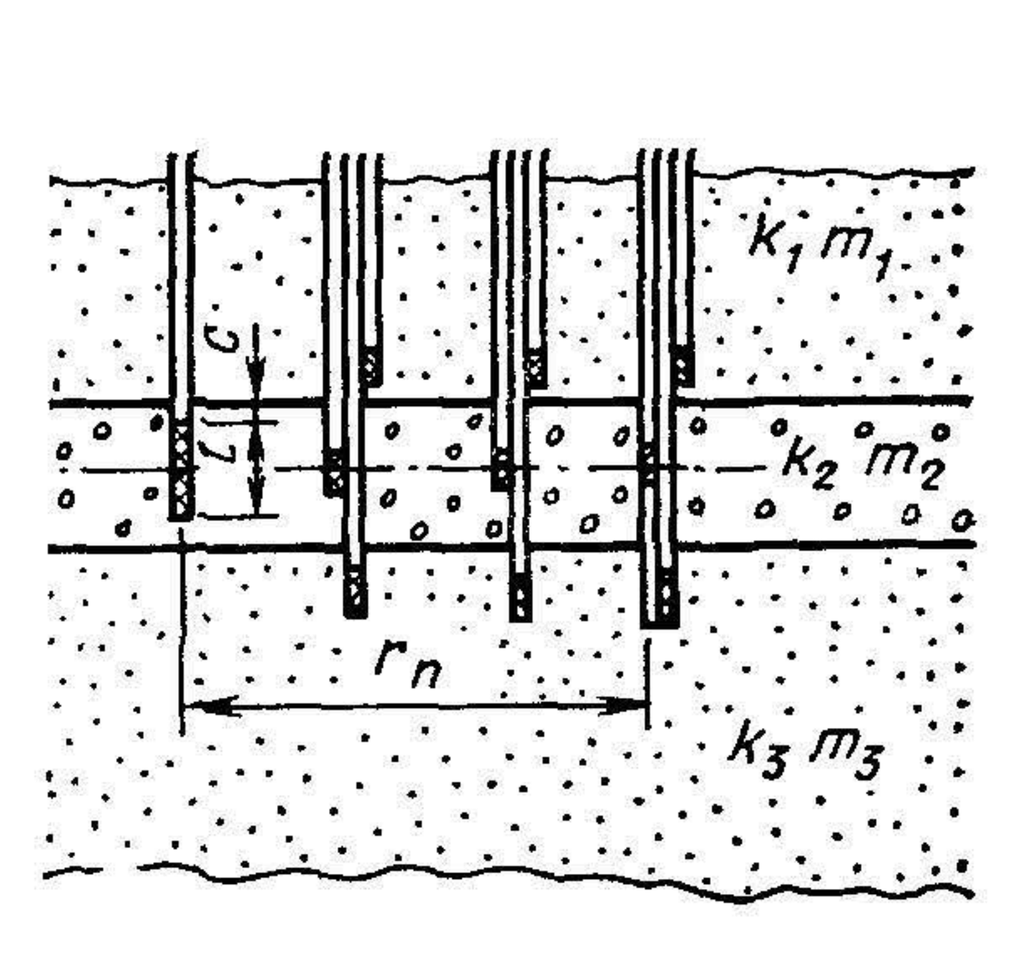



Рис. 10. Схема трехслойной толщи (крайние слои полуограниченные)

$k_1 < k_2 > k_3$, $l \leqslant m_2$, $m_1/2 \geqslant l \leqslant m_3/2$, $m_1/2 > r_n \leqslant 1 m_3/2$

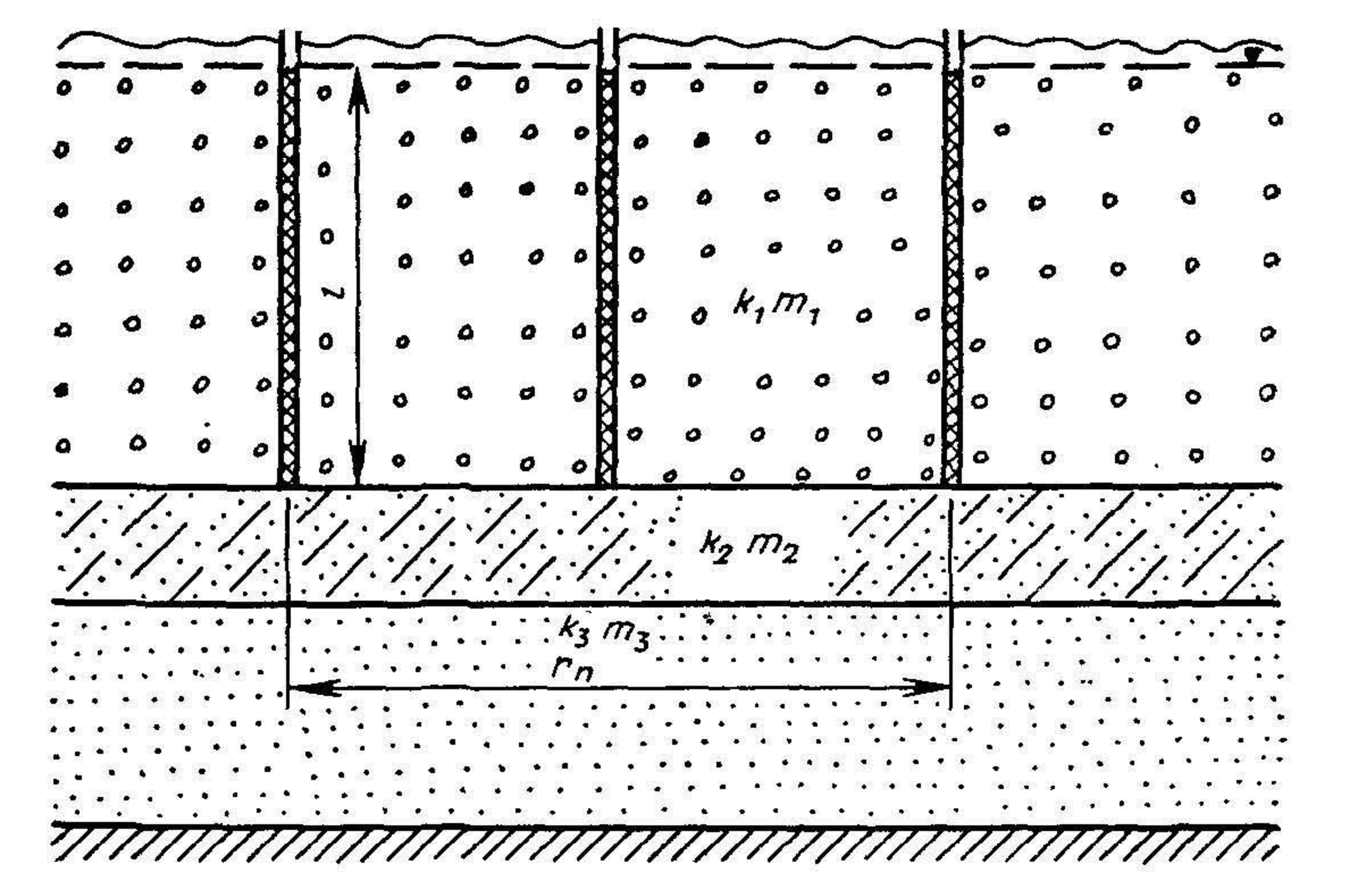



Рис. 11. Схема трехслойной толщи (один крайний слой полуограниченный, другой — ограниченный)

за уровнями по ним могут быть использованы для расчета коэффициентов фильтрации верхнего (и нижнего) слоя (рис. 10). Расстояния от наблюдательных скважин до центральной не должны превышать половины мощности верхнего и нижнего слоя. Первую наблюдательную скважину рекомендуется располагать не ближе длины фильтра центральной скважины.

Для указанных схем расчет коэффициентов фильтрации выполняется по формулам установившегося движения [5].

**2.35.** В трехслойной толще мощность одного из крайних слоев велика, а другого ограничена, а средний слой обладает меньшей проницаемостью по сравнению с крайними.

При соответствующем числе и расположении наблюдательных скважин при откачке из какого-либо крайнего слоя можно определить коэффициенты фильтрации как слоя, из которого велась откачка, так и среднего, менее проницаемого. При расположении фильтра центральной скважины в верхнем слое его длина должна быть равной мощности этого слоя; фильтры наблюдательных скважин следует располагать вблизи границы со средним слоем, расстояние от них до центральной не должно превышать половины суммарной мощности всей водоносной толщи. Число наблюдательных скважин на луче — не менее 4 для определения коэффициента фильтрации верхнего и среднего слоя и не менее 2—3 — для определения коэффициента фильтрации среднего слоя (рис. 11).

При установке фильтра центральной скважины в нижнем ограниченном слое рекомендуется длину его принимать равной мощности этого слоя (скважины должны быть совершенными). Для определения коэффициента фильтрации среднего числа наблюдательных скважин на луче должно быть не менее 4, при этом два фильтра оборудуются на верхний хорошо проницаемый слой вблизи его границы со средним слоем (рис. 12).

Для указанных схем расчет коэффициентов фильтрации выполняется по формулам установившегося движения [5].

**2.36.** В случае когда в трехслойной толще проницаемость слоев уменьшается с глубиной, при откачаках из верхнего слоя расстояния от наблюдательный скважин до центральной не должны превышать половины суммарной мощности всей водоносной толщи, число и расположение фильтров — как в п. 2.35 при откачке из верхнего слоя.

При откачке из среднего слоя число и расположение фильтров скважин аналогично п. 2.34 для случая, когда средний слой более водопроницаемый (рис. 13).

*При откачке из нижнего слоя верхний слой принимается полуограниченным.* Число и расположение фильтров принимается ана-

Рис. 12. Схема трехслойной толщи (крайний слой полуограниченный, другой — ограниченный)

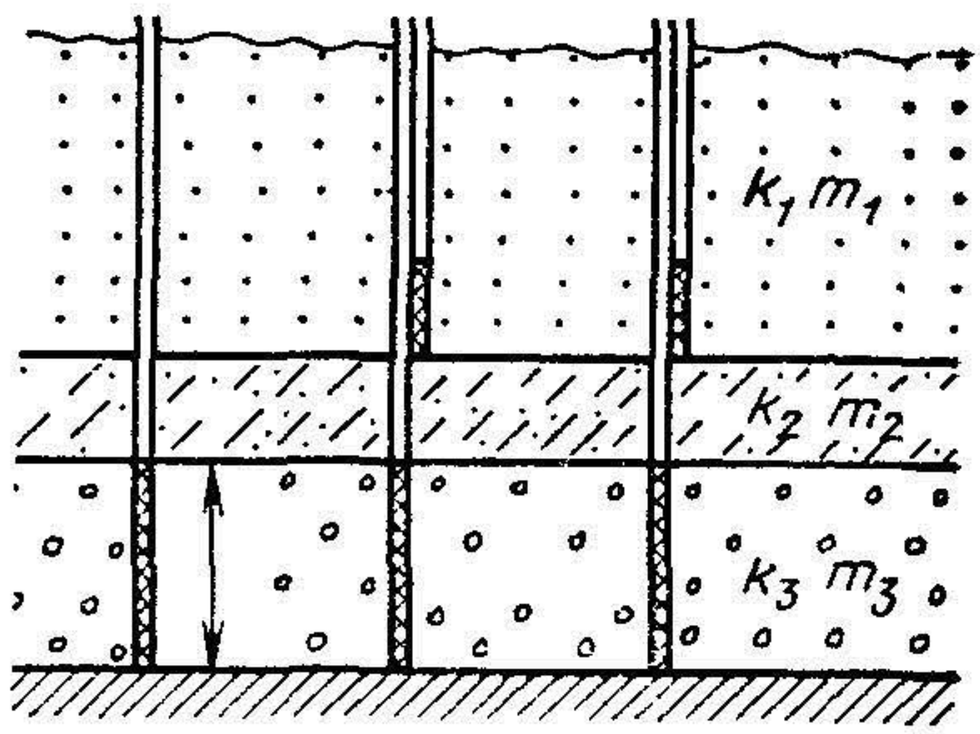
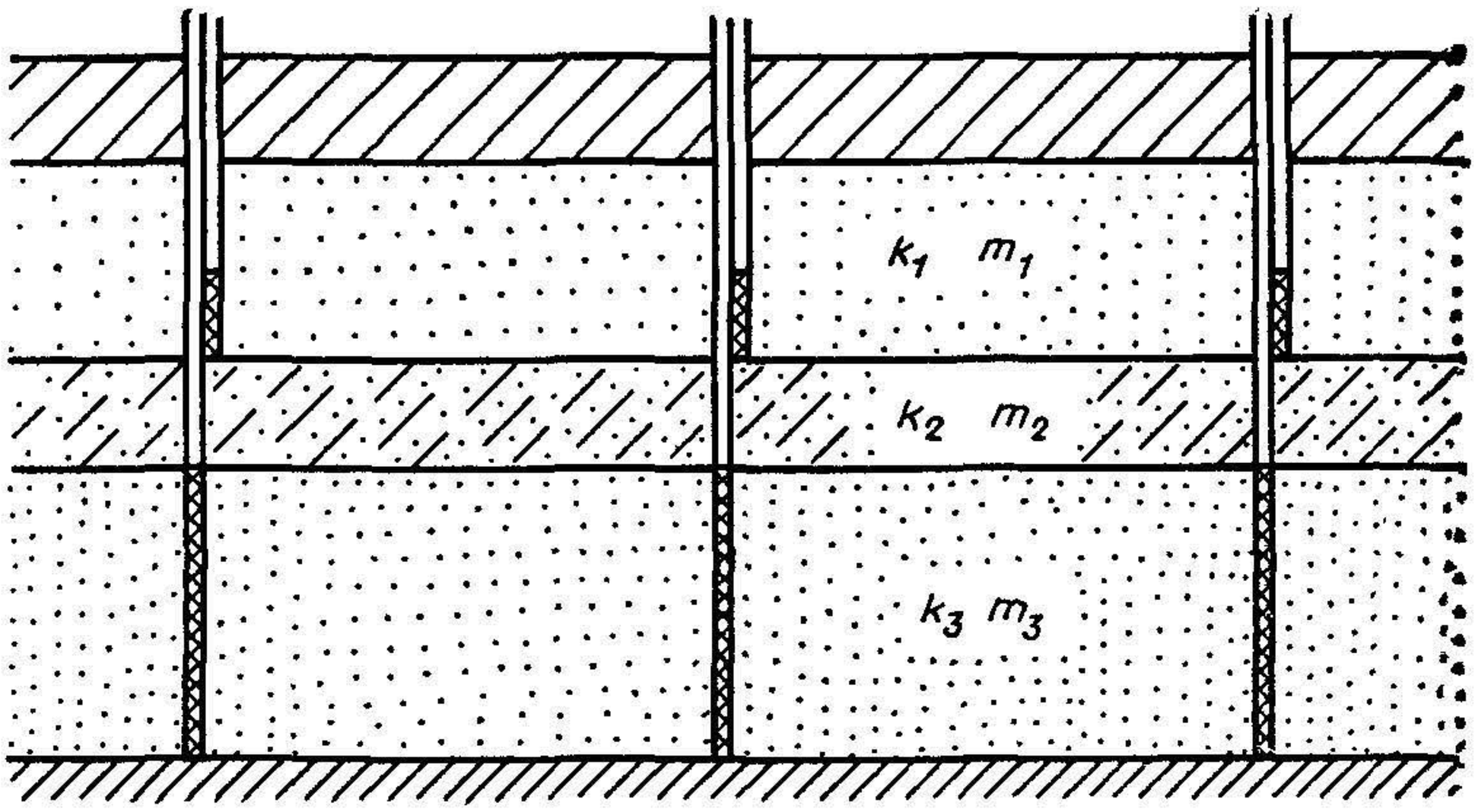



Рис. 13. Схема трехслойной толщи (верхний слой имеет постоянный напор)




логично случаю, когда средний слой малопроницаемый, а смежные слои полуограниченные (см. рис. 9).

**2.37.** При определении *гидрогеологических параметров слоев* методами, основанными на неустановившемся движении, для случая, когда средний слой малопроницаемый, а крайние слои взаимодействуют друг с другом и верхний слой имеет постоянный напор, то при мощности среднего слоя менее 10 м наблюдательные скважины располагаются в основном слое на расстоянии не более 50 и 100 м от центральной, а наблюдательные скважины на верхний слой располагаются рядом с центральной (рис. 13). Расчет ведется по формуле (155).

**2.38.** Для изучения условий взаимодействия водоносных горизонтов в многослойных толщах наблюдательные скважины закладываются как на опробуемый водоносный горизонт, так и на горизонты, из которых может происходить перетекание.

Наблюдательные скважины на смежные горизонты следует размещать рядом с наблюдательными скважинами на опробуемый водоносный слой, но количество их может быть меньше. Одна наблюдательная скважина на смежный водоносный горизонт оборудуется рядом с центральной скважиной.

Результаты по наблюдательным скважинам, оборудованным на опробуемый водоносный слой, используются для расчета гидрогеологических параметров опробуемого слоя и коэффициента перетекания, а по наблюдательным скважинам на смежные горизонты — для решения вопроса о наличии перетока и выбора расчетной схемы.

**2.39.** Испытания для оценки взаимодействия соседних слоев многослойной водоносной толщи могут производиться в случае, когда мощность разделяющих слабопроницаемых слоев не превышает 10 м и ориентировочные их коэффициенты фильтрации не менее $10^{-3}$ — $10^{-4}$ м/сут.

В случае когда мощности разделяющих слабопроницаемых пластов более 5 м и их коэффициент фильтрации менее $10^{-4}$ м/сутки, следует замерять понижения напоров в этих слоях вследствие проявления в них упругого режима. Для этого рядом с первой наблюдательной скважиной на опробуемый водоносный пласт рекомендуется оборудовать две-три наблюдательные точки по мощности слабопроницаемого слоя.

Длина фильтров этих скважин рекомендуется в 4—5 раз менее мощности слоя; расстояние конца фильтра, ближнего к опробуемому пласту, должно быть больше длины фильтра.

Однако наблюдения по этим наблюдательным скважинам связаны с погрешностями за счет их инерционности, зависящей от диаметра фильтров, скорости снижения уровня, состояния прифильтровой зоны. Чтобы исключить эти погрешности в разделяющих слабопроницаемых пластах, рекомендуется устанавливать датчики порового давления [9].

**2.40.** Многослойная толща может быть представлена часто чередующимися слоями различной водопроницаемости. При раздельном опробовании слоев длина фильтров должна соответствовать мощности опробуемого слоя.

Определение коэффициентов фильтрации может производиться как одиночными (обычно зональными), так и кустовыми откачками.

Во многих случаях для определения коэффициента фильтрации отдельных слоев необходимо многослойную толщу свести к 2- или 3-слойной.

## Откачки в условиях анизотропных пластов

**2.41.** Фильтрационно-анизотропными пластами (толщами, горизонтами) являются пласты, коэффициенты фильтрации которых различны в разных направлениях.

Фильтрационная анизотропия определяется коэффициентом, выражающимся отношением наименьшего коэффициента фильтрации к наибольшему.

Анизотропия связана с литологическими, структурными и текстурными особенностями пласта; максимальная величина водопроницаемости отмечается по преобладающему направлению пористости, трещиноватости, а минимальная — в направлении перпендикулярном ему.

Примером, когда коэффициент фильтрации в вертикальном направлении больше, чем в горизонтальном, являются пласты, сложенные лессовыми грунтами. Слоистое строение водоносных пластов характеризуется наоборот большими значениями коэффициентов фильтрации в горизонтальном направлении.

Значение различной водопроницаемости пород по главным направлениям фильтрации имеет очень большое практическое значение для рационального проектирования дренажных систем на защищаемых от подтопления территориях, определения параметров фильтрационных завес и т. д.

**2.42.** При проведении кустовых откачек в неограниченных, неоднородных анизотропных пластах следует задавать два луча, ориентированных по направлению осей анизотропии.

При кустовых откачках вблизи границ пласта наблюдательные скважины следует располагать также по двум лучам, а с весьма сложными границами пласта — по трем лучам с учетом рекомендаций, изложенных в п. 2.18.

**2.43.** Для определения степени анизотропии водоносного пласта необходимо иметь на одном луче опытного куста не менее 4 наблюдательных скважин.

Если коэффициент фильтрационной анизотропии изменяется более чем на один порядок, число наблюдательных скважин на луче следует увеличить до 6.

В случае когда ориентировка двух главных осей анизотропии известна, а мощность водоносного пласта достаточно велика, то для определения коэффициентов фильтрации водоносного пласта по главным осям анизотропии можно ограничиться двумя наблюдательными скважинами на луче.

При назначении числа лучей и количества скважин при проведении опытных откачек в анизотропных пластах следует учитывать рекомендации, изложенные в пп. 2.8—2.13.

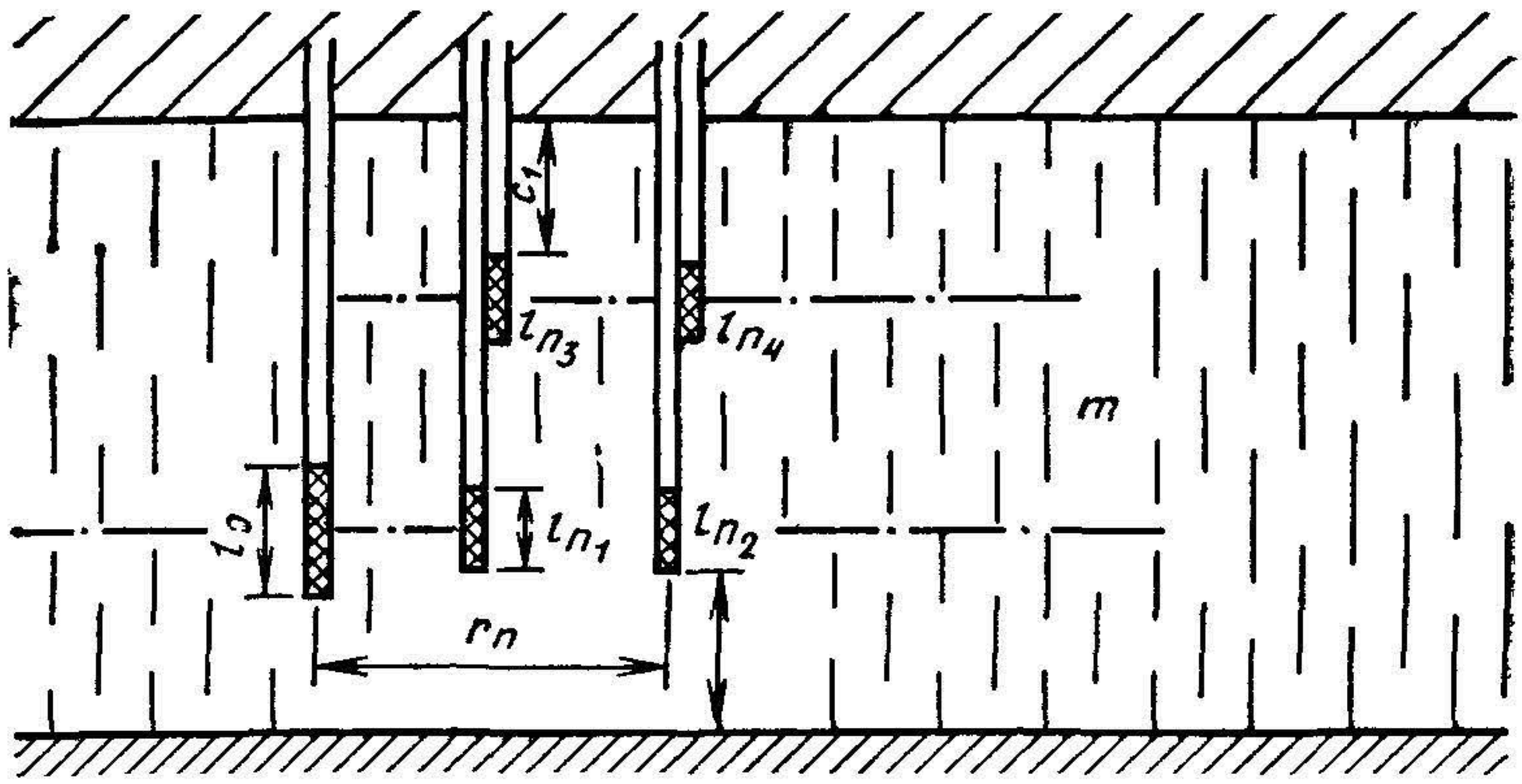



Рис. 14. Схема размещения опытного куста скважин в однородно-анизотропном пласте

**2.44.** Для определения вертикальной анизотропии фильтры наблюдательных скважин на каждом луче следует располагать на двух горизонтах: на одних отметках с фильтром центральной скважины и на отметках выше или ниже фильтра центральной скважины (рис. 14).

**2.45.** При опробовании слоистой толщи с относительно небольшими мощностями слоев, когда фильтры центральной и наблюдательных скважин установлены в толще таким образом, что отражается закономерность в чередовании слоев разреза, и имеют длину, превышающую в несколько раз мощности отдельных слоев, то ее можно считать анизотропной. При этом расстояние между серединами фильтров по вертикали должно быть более пяти мощностей отдельных слоев толщи.

**2.46.** При установившемся режиме фильтрации В. Д. Бабущкиным предложены решения для нахождения коэффициентов фильтрации по главным осям анизотропии для ряда типовых схем [5], часть из которых приведена ниже.

**2.47.** Для случая полуограниченного однородно-анизотропного пласта с верхним водоупором или свободной поверхностью потока фильтры скважин следует располагать в верхней половине пласта, длина их не должна превышать $^1/_6$ мощности этого пласта, а расстояния между фильтрами (на обоих горизонтах их расположения) не должны быть менее двух длин фильтров. Наблюдательные скважины должны быть расположены на расстоянии не более $0{,}5m/\lambda$ ($m$ — мощность пласта, $\lambda$ — коэффициент анизотропии).

Если фильтр центральной скважины примыкает к кровле пласта, то фильтры второго горизонта наблюдательных скважин следу-

ет располагать ниже фильтра центральной скважины, но в пределах верхней половины слоя.

Если же фильтр центральной скважины удален от кровли водоносного пласта или затоплен, то фильтры второго горизонта наблюдательных скважин могут примыкать к кровле водоносного пласта (или свободной поверхности), а крайняя наблюдательная скважина должна быть удалена от центральной на расстояние, равное или меньшее $c/2\lambda$ ($c$ — расстояние верхнего конца фильтра центральной скважины от кровли пласта).

**2.48.** В случае когда водоносный анизотропный пласт ограничен сверху водоупором или свободной поверхностью, а снизу водоупором, рекомендуется на каждом луче оборудовать 5 наблюдательных скважин, из которых две — —с фильтрами на уровне фильтра центральной скважины вблизи нее, две — с фильтрами ниже или выше фильтра центральной скважины на расстоянии $(0{,}5—1)m$ от центральной скважины, последняя удаляется от центральной на расстояние $(1—2)m$ и больше ($m$ — мощность пласта). Расстояния между центрами фильтров по вертикали должны превышать длину фильтра центральной скважины.

**2.49.** В случае когда имеется 2 контактирующих анизотропных водоносных слоя, один из которых полуограниченный, а другой ограничен водоупором или поверхностью постоянного напора, то рекомендуется проводить кустовые откачки раздельно из каждого слоя с устройством наблюдательных скважин в обоих слоях. При этом в каждом слое оборудуется по четыре наблюдательные скважины на каждом луче на двух горизонтах.

В слое ограниченной мощности фильтр центральной скважины допускается располагать в любой части слоя, но длина его не должна превышать $^1/_3$ мощности этого слоя. Расстояние между центрами фильтров двух горизонтов должно быть не менее двух длин фильтра центральной скважины.

В полуограниченном слое фильтры следует располагать в верхней половине нижнего слоя с условием, чтобы расстояние между центрами фильтров по вертикали было не менее двух длин фильтра центральной скважины.

Расчеты рекомендуется выполнять с использованием ЭВМ.

**2.50.** Для случая полуограниченного однородно-анизотропного пласта, ограниченного сверху поверхностью постоянного напора, фильтр центральной скважины следует располагать в верхней половине пласта; расстояние от крайней наблюдательной скважины до центральной не должно превышать отношения мощности к коэффициенту анизотропии.

К такой схеме можно, например, привести условия, приведен-

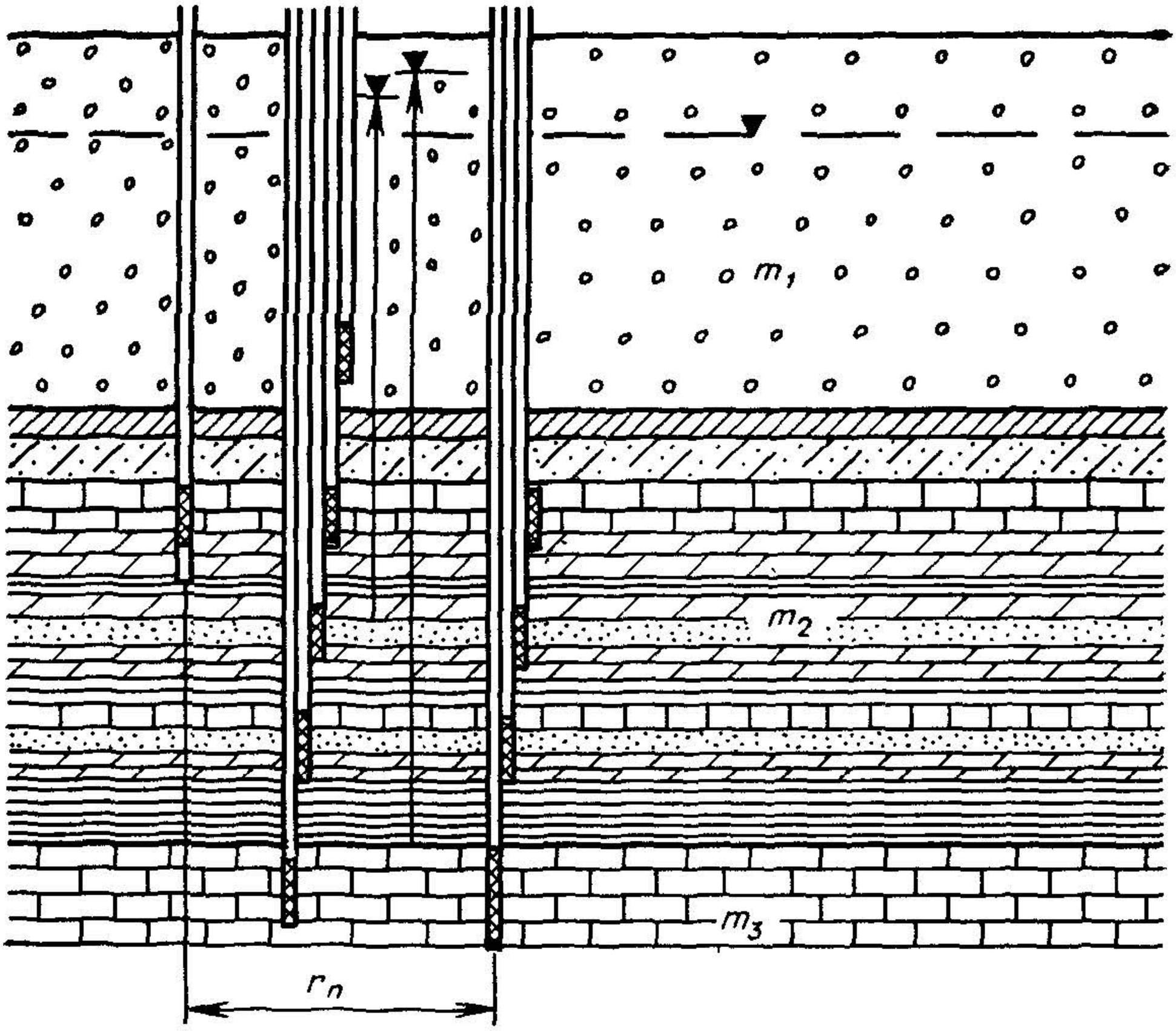



Рис. 15. Схема размещения опытного куста скважин в анизотропном пласте, ограниченном сверху границей постоянного напора

ные на рис. 15. В этом случае наблюдательные скважины расположены по вертикали на пяти уровнях.

**2.51.** Откачки при наличии границ в плане можно производить с учетом их влияния и без учета.

Для того чтобы избежать влияния границ разной проницаемости, следует проводить кустовую откачку небольшой длительности, а расчеты производятся методами, рекомендуемыми для неограниченных пластов. Куст в этом случае располагают согласно рекомендациям, изложенным в пп. 2.17, 2.18.

При необходимости учета влияния границ разной проницаемости куст скважин следует располагать вблизи этой границы, а наблюдательные скважины рекомендуется оборудовать в обеих зонах с разной проницаемостью.

При расположении скважин следует учитывать рекомендации, изложенные в п. 2.18.

**2.52.** В анизотропном пласте, связанном с рекой, для определения сопротивления русла фильтры наблюдательных скважин должны располагаться в трех интервалах по вертикали разреза — в верх-

нем, нижнем и среднем; на урезе реки оборудуется одна скважина с фильтром длиной 1,5—2 м, установленным непосредственно «под уровень».

### Откачки в условиях трещиноватых и закарстованных пород

**2.53.** Особенности определения гидрогеологических параметров в трещинно-карстовых водоносных горизонтах связаны с «двойной пустотностью» водовмещающей среды, наличием часто сильно выраженной анизотропии фильтрационных свойств, возможным нарушением радиальности и сплошности потока (за счет крупных трещин, карстовых пустот, непроницаемых границ и т. п.). В связи с этим опробование трещинно-карстовых водоносных толщ целесообразно производить преимущественно кустовыми откачками.

**2.54.** Схема опытного куста в трещинно-карстовых водоносных горизонтах определяется характером трещиноватости, закарстованности пластов; рекомендуется лучи наблюдательных скважин располагать по преобладающему направлению трещиноватости, закарстованности и перпендикулярно ему.

Двухлучевые кусты применяются также при откачках из ограниченных пластов, причем лучи желательно располагать параллельно и перпендикулярно границам.

**2.55.** В относительно равномерно-трещиноватых породах, когда «двойная пустотность» не проявляется, методика проведения опытных откачек и определение гидрогеологических параметров практически не отличаются от методики откачек в пористых пластах. В таких условиях местоположение куста и размещение наблюдательных скважин должны соответствовать рекомендациям, изложенным в пп. 2.3—2.15., а число скважин — в п. 2.18.

**2.56.** При выраженной двойной пустотности рекомендуется число наблюдательных скважин в кусте иметь не менее 4—6.

Ближайшую к центральной наблюдательную скважину, с целью исключения влияния несовершенства скважин и искажения величины понижений в зоне «сверхпроводимости» пласта, следует проходить на расстоянии, примерно равном $(0{,}7—1{,}0)m$ ($m$ — мощность горизонта). При большой глубине залегания и большой мощности горизонта дальняя скважина должна быть удалена от возмущающей на расстояние не менее $(1{,}5—2)m$.

**2.57.** Расположение куста и размещение наблюдательных скважин с учетом влияния границ в породах, характеризующихся равномерной трещиноватостью, аналогично кустам для откачек из пористых пластов.

В пластах с весьма неравномерной трещиноватостью число лучей может быть более 2, а число скважн в кусте может быть более 10.

В целях исключения влияния границ на опытные закономерности откачки с погрешностью определения параметров 10 %. В. Г. Самсоновым рекомендуется использовать результаты по наблюдательным скважинам, расположенным на расстоянии от центральной до 0,3—0,45 $L$ ($L$ — расстояние центральной скважины от границы).

**2.58.** В двухслойных пластах, особенно в долинах рек, когда опробуемый трещинно-карстовый водоносный горизонт перекрывается аллювием, наблюдательные скважины размещаются в одних и тех же точках на опробуемый водоносный горизонт и на аллювий («ярусные» пьезометры).

**2.59.** Опытные кусты для определения сопротивления русловых отложений должны состоять из двух лучей с таким расчетом, чтобы удаление дальней наблюдательной скважины от возмущающей в параллельном луче не превышало расстояния от возмущающей скважины до реки. На урезе реки, в луче, перпендикулярном ему, должны быть оборудованы наблюдательные скважины на трещинно-карстовый горизонт и на перекрывающий аллювиальный — для оценки возможности отрыва уровня трещинно-карстовых вод от подошвы аллювия, а аллювиального горизонта — от дна реки. Кроме того, на аллювий закладывается еще одна скважина, вскрывающая только самую верхнюю часть водоносного горизонта, с целью учета влияния анизотропии фильтрационных свойств в разрезе на условия отрыва.

## Режим и продолжительность испытаний

**2.60.** При проведении откачек для определения гидрогеологических параметров рекомендуется соблюдать постоянный характер возмущения. Откачки должны проводиться с постоянной величиной дебита в продолжение всего испытания или иметь постоянную величину понижения (при выпусках) (ГОСТ 23278—78). Современная методика обработки и интерпретации откачек также позволяют проводить испытания при сложном характере возмущения, однако это нецелесообразно.

Обязательным условием при проведении откачки является непрерывность испытания.

**2.61.** Для достижения эффективности результатов испытания необходимо, чтобы водоотбор при кустовой откачке (выпуске) обеспечивал понижение в возмущающих скважинах не менее 3 м — в безнапорных водоносных горизонтах и 4 м — в напорных.

Такое понижение при длительности откачки 5—10 сут обеспечивает разность понижений в соседних скважинах и понижение в самой отдаленной скважине не менее 20 см. В общем случае разность величин понижений уровня воды в соседних наблюдательных скважинах и величина понижения уровня на конец откачки в дальней

наблюдательной скважине должны превышать абсолютную величину возможной ошибки измерения уровня не менее чем в 10 раз (ГОСТ 23278—78).

Откачки у поверхностных водоемов (водотоков) следует проводить с таким дебитом, который не должен приводить к понижению уровня подземных вод под водотоком (водоемом) ниже подошвы экранизирующего слоя его ложа, так как в противном случае обработка опытных данных существенно усложняется.

При откачке из одиночной скважины величина понижения должна быть не менее 1,0 м.

**2.62.** Испытание необходимо проводить при одной величине расхода или понижения (ГОСТ 23378—78).

Откачки при 2-3 понижениях проводят для решения ряда специальных задач, таких, например, как установление зависимости расхода от понижения (получение кривой дебита), определение естественной разгрузки подземных вод, оценки суффозионной устойчивости заполнителя трещин и пустот в скальных породах и др.

**2.63.** Необходимая величина понижения зависит от величины дебита. Малодебитная откачка даже при ее большой длительности не дает достаточно достоверных результатов. Дебит скважины зависит от фильтрационных свойств водовмещающих пород и производительности насоса. Поэтому выбор водоприемника и дебит скважины следует назначать по результатам прокачки скважины или ориентировочно по приближенным значениям водопроницаемости исследуемых грунтов. Необходимую величину дебита при кустовой откачке можно выбрать по данным коэффициента водопроводимости пластов для следующих трех групп грунтов (табл. 2).

Таблица 2

| Группа | Грунты | Коэффициенты водопроводимости, м²/сут | Дебит, л/с |
|---|---|---|---|
| 1 | Дочетвертичные пески, слабые песчаники, некарстующиеся трещиноватые породы | 50—500 | 5—25 |
| 2 | Четвертичные аллювиальные пески, аллювиально-пролювиальные песчано-гравийные отложения, трещинно-поровые, трещинно-кавернозные и сильно трещиноватые породы | 500—1000 | 25—50 |
| 3 | Галечники с песчано-гравийным заполнителем, интенсивно трещиноватые и закарстованные пласты | 1000—3000 | 50—150 |

**2.64.** Продолжительность откачки определяется гидрогеологическими условиями, принятым видом откачки и ее назначением (см. пп. 1.9, 1.11, 1.12).

Продолжительность одиночных откачек на одно понижение в однородных породах рекомендуется принимать в пределах 0,5—2 сут в зависимости от их назначения (см. пп. 1.8, 1.9, 1.11). Меньшая продолжительность откачек не рекомендуется, так как это уменьшает область, характеризуемую опытом, и увеличивает влияние призабойной зоны, а также из-за невозможности получения представительного графика временного прослеживания по периоду восстановления. В безнапорных водах при откачке меньшей продолжительности ее результаты будут искажаться за счет влияния вертикальных составляющих скорости фильтрации у скважины и процессов формирования гравитационной водоотдачи.

**2.65.** Продолжительность кустовой откачки должна быть рациональной и обоснованной в зависимости от необходимости определения тех или иных фильтрационных параметров. Ее необходимо определять на основе предварительных расчетов с условием, что при выбранной длительности откачки воды должны быть получены представительные зависимости изменения понижения уровня от времени и по площади, а наблюдательные скважины должны быть расположены в зоне квазистационарного режима (ГОСТ 23278—78).

Контрольное время $t_k$ наступления квазистационарного режима ориентировочно определяется, исходя из значения аргумента $r^2/4at < 0{,}1$ ($r$ — расстояние наблюдательной скважины от центральной, м; $a$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности), который для предварительных расчетов может быть принят по табл. 3).

**2.66.** При назначении длительности возмущения необходимо

Таблица 3

| Наименование грунтов | Коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности), м²/сут | |
|---|---|---|
| | безнапорных пластов | напорных пластов |
| Глинистые грунты (суглинки) | $4—2\cdot10^2$ | $2\cdot10—8\cdot10^2$ |
| Пески пылеватые, супеси | $2\cdot10—2\cdot10^2$ | $1\cdot10^2—1\cdot10^3$ |
| Пески мелкие | $(0{,}2—1)10^3$ | $(0{,}25—1{,}25)10^4$ |
| Пески средней крупности и гравелистые | $(0{,}5—3)10^3$ | $(0{,}15—1)10^5$ |
| Гравийно-галечные отложения | $(1—2)10^4$ | $(0{,}5—1)10^6$ |
| Известняки | $(0{,}4—1)10^4$ | $(3—8)10^7$ |
| Песчаники | $(0{,}4—1)10^4$ | $(2{,}5—5)10^7$ |
| Изверженные породы | $(0{,}2—1)10^4$ | $(0{,}8—4)10^7$ |

учитывать специфику установления квазистационарного режима в различных гидрогеологических условиях — эффект Боултона при опробовании безнапорных водоносных горизонтов, проявление «двойной пористости» в трещинных напорных и безнапорных водоносных горизонтах, перетекание в слоистых пластах.

**2.67.** Длительность кустовой откачки для напорных зернистых водоносных горизонтов (пластов) определяется, исходя из условия $t=5t_k$ ($t_k$ — время наступления квазистационарного режима в дальней наблюдательной скважине). При выполнении откачки это время корректируется построением индикаторных графиков $S=f(\lg t)$ или $S=f[\lg(t/r^2)]$, в последнем случае критерием допустимости прекращения кустовой откачки служит выход графиков, построенных для различных наблюдательных скважин, на общую асимптоту.

При наиболее часто встречающихся значениях пьезопроводности продолжительность кустовой откачки в напорных зернистых водоносных пластах (горизонтах) для определения основных гидрогеологических параметров ориентировочно составляет 6—11 сут.

**2.68.** Продолжительность кустовой откачки в безнапорных зернистых водоносных пластах следует назначать с учетом запаздывания квазистационарного режима. Величина времени этого запаздывания обратно пропорциональна удаленности наблюдательной скважины и величине контрольного времени. Примерное время этого запаздывания в самой отдаленной наблюдательной скважине не превышает 2 сут.

Ориентировочная продолжительность кустовых откачек в безнапорных зернистых водоносных горизонтах для определения основных гидрогеологических параметров определяется 11—15 сут (при использовании на площадных графиках результатов наблюдений дальней наблюдательной скважины, расположенной на расстоянии около 150 м от возмущающей) при средней уровнепроводности пласта $a=5\cdot10^3$ м$^2$/сут. В процессе откачки ее продолжительность корректируется построением комбинированных графиков для всех наблюдательных скважин $S=f[\lg(t/r^2)]$. Критерием прекращения откачки будет служить выход этих графиков на общую асимптоту.

**2.69.** Продолжительность кустовых откачек в трещинных и трещинно-карстовых напорных и безнапорных водоносных горизонтах следует назначать также с учетом запаздывания квазистационарного режима вследствие проявления в этих условиях эффекта «двойной пористости». Продолжительность откачек в случае отсутствия эффекта «двойной пористости» определяется в соответствии с п. 2.65. Примерную длительность кустовых откачек в трещинных и трещинно-карстовых водоносных пластах можно принять в пределах 10—15 сут.

В процессе ведения откачки длительность контролируется построением комбинированных графиков. Критерием прекращения откачки будет выход графиков $S=f[\lg t/r^2)]$ всех наблюдательных сква-

жин на одну асимптоту — для равномерно трещиноватых пластов или их параллельность — для сильно трещиноватых и трещинно-карстовых пластов.

**2.70.** Для оценки взаимодействия водоносных горизонтов в двухслойной толще продолжительность возмущения зависит от водопроницаемости верхнего слабофильтрующегося слоя. Если этот слой представлен песками с коэффициентами фильтрации в пределах 0,1—1 м/сут, продолжительность кустовых откачек ориентировочно можно принять 10—15 сут, если верхний слой представлен супесями и суглинками с коэффициентом фильтрации в пределах $10^{-2}$—$10^{-3}$ м/сут, продолжительность откачек следует увеличить до 20—30 сут.

В трехслойной толще для определения параметров перетекания продолжительность кустовых откачек при мощности разделяющего слоя не более 10 м и коэффициенте его фильтрации, превышающем $10^{-4}$ м/сут, должна быть не менее 30—40 сут.

При коэффициентах фильтрации меньше указанной величины продолжительность возмущения возрастает до нескольких месяцев, и рациональность проведения откачки необходимо специально обосновать в программе работ.

**2.71.** Для оценки степени взаимодействия подземных и поверхностных вод и для определения гидравлического сопротивления русловых (донных) отложений продолжительность кустовой откачки зависит от времени наступления стационарного режима, зависящего от гидрогеологических условий и расстояния куста скважин от водотока (водоема). Продолжительность откачки, необходимая для достижения установившейся фильтрации, колеблется от нескольких часов (в условиях однородного изолированного пласта и совершенного водотока) до 10—15 сут и более [при экранированном ложе водотока (водоема)].

**2.72.** При проведении откачек в условиях стационарного режима продолжительность возмущения определяется временем стабилизации уровня при стабильном дебите, которое должно составлять не менее одной трети общей продолжительности испытания.

## Выбор способа бурения и конструкции скважин для проведения испытания и технологические требования к их сооружению

**2.73.** Выбор способа бурения при сооружении гидрогеологических скважин наряду с экономичностью проходки и опробования определяется получением достоверной информации. Это достигается устройством скважин, прифильтровая зона которых должна иметь фильтрационные свойства, близкие к пластовым, или превышать их. Такое требование в равной степени приемлемо для центральной и наблюдательных скважин опытных кустов.

**2.74.** Бурение гидрогеологических (опытных, наблюдательных) скважин осуществляется ударно-канатным и вращательными способами (ГОСТ 23278—78). Допускается бурение комбинированным способом. Основные показатели применения различных способов бурения приведены в табл. 4.

**2.75.** При бурении гидрогеологических скважин при изысканиях для гражданских, промышленных, гидротехнических и мелиоративных сооружений промывка забоя допускается только чистой водой, применение глинистых растворов запрещается (ГОСТ 23278—78).

При изысканиях подземных вод для водоснабжения бурение скважин с промывкой глинистым раствором допускается в рыхлых или неустойчивых скальных грунтах, обычно имеющих значительную водопроницаемость (трещиноватые, закарстованные, гравийные), при условии последующей тщательной их разглинизации.

**2.76.** Конструкции гидрогеологических скважин определяются целью работ и зависят от глубины залегания водоносного горизонта, его напора, условий залегания водоупоров, конечного диаметра и дебита скважины, необходимости изоляции от смежных водоносных горизонтов.

Диаметр фильтра (водоприемной части) возмущающей скважины должен быть достаточным для установки водоподъемного оборудования необходимой производительности, обеспечивающего достаточную степень возмущения водоносного пласта, и измерительных приборов.

В маловодообильных водоносных горизонтах (с ожидаемым дебитом скважин до 0,3 л/с) диаметр водоприемной части фильтров возмущающих скважин должен быть не менее 100 мм, а при значительной водообильности скважины — не менее 150—250 мм. Рекомендуется диаметры фильтров наблюдательных скважин принимать 80—100 мм.

**2.77.** Возмущающие и наблюдательные скважины при мощности водоносного горизонта до 15—20 м рекомендуется оборудовать как совершенные.

При оборудовании несовершенных скважин в опытном кусте необходимо, чтобы поперечные оси фильтров всех скважин куста были примерно в одной плоскости. В безнапорных и напорных горизонтальных пластах эта плоскость должна быть горизонтальной, а в наклонных пластах она должна совпадать с плоскостью напластования.

При суммарном опробовании сложнослоистых толщ необходимо оборудовать скважины совершенные по степени вскрытия горизонта или при оборудовании фильтром только основных водопроницаемых слоев толщи обеспечить гравийную засыпку по всему стволу скважины в пределах опробуемой толщи.

**2.78.** В сложных гидрогеологических условиях, когда необходимо перекрыть вышележащие водонасыщенные грунты или для преду-

Таблица 4

| Способы бурения | Преимущества | Недостатки | Рекомендуемые условия применения | Характер крепления стенок скважины | Литологический состав пород и температурное состояние |
|---|---|---|---|---|---|
| Ударно-канатный | Получение качественной гидрогеологической информации за счет отсутствия глинизации водоносных горизонтов; транспортная база установок позволяет использовать этот способ бурения в самых разнообразных природных условиях; погрешность установления границ водоносного пласта 0,5—1,0 м | Большая металлоемкость конструкции скважин; более низкие, чем при вращательном способе бурения (технические и коммерческие), скорости бурения | Основной способ бурения гидрогеологических скважин; глубина бурения до 150 м и более; бурение центральных и наблюдательных скважин | Крепление трубами | Глины, суглинки, супеси, пески, лессы, торфяники, гравийно-галечниковые и валунные отложения в таком состоянии |
| | | | | Частичное подвижное крепление призабойной части и удержание стенок от обрушения избыточным гидростатическим давлением более | Глины, суглинки, супеси, пески, лессы, торфяники |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0,3 атм<br>Без крепления | Глины, суглинки, супеси, пески, лессы, торфяники, лед, гравийно-галечниковые и валунные отложения в мерзлом состоянии и скальные грунты |
| Вращательный с обратной промывкой | Высокие (технические и коммерческие) скорости бурения; возможность получения представительных гидрогеологических параметров при бурении без глинистого раствора | Необходимость сооружения скважин большего диаметра; глубина уровня грунтовых вод не более 3 м; большой расход воды при бурении; возможность бурения лишь в мягких и рыхлых породах; трудности организации работ при отрицательных температурах; необходимость создания избыточного гидростатического давления 0,3 атм; погрешность уста- | Бурение центральных скважин; бурение в рыхлых породах, не содержащих фракций размером более 150 мм; при залегании уровня грунтовых вод на глубине не более 3 м; глубина бурения до 300—400 м | Без крепления | Глины, суглинки, пески, супеси, лессы, торфяники, гравийно-галечниковые отложения в талом состоянии |

*Продолжение табл. 4*

| Способы бурения | Преимущества | Недостатки | Рекомендуемые условия применения | Характер крепления стенок скважины | Литологический состав пород и температурное состояние |
|---|---|---|---|---|---|
| | | новления границ водоносного пласта ±1,0 м | | | |
| Вращательный с прямой промывкой сплошным забоем | Возможность бурения скважин в грунтах, различных по категории буримости; скорости бурения (технические и коммерческие), превышающие скорость ударно-канатного бурения в 3—5 раз; простые конструкции скважин | Искажение фильтрационных характеристик пластов в результате кольматации исследуемых грунтов глинистым раствором; проведение сложных работ по восстановлению производительности скважин с затратой до 30 % времени от общей продолжительности сооружения скважины; сложность организации работ; необходимость применения каротажных работ; погрешность ус- | При бурении высоконапорных водоносных горизонтов; с использованием в качестве промывочных меловых и глинисто-меловых растворов с содержанием мела до 15 % по весу сухого вещества с последующей соляно-кислотной обработкой; каротаж скважин; применение пластоиспытателей для опробования водоносных горизонтов в процессе бурения; бурение центральных и наблю- | Без крепления с применением глинистого раствора; без крепления; удержание стенок от обрушения за счет избыточного гидростатического давления, превышающего на 3 м и более напор водоносного пласта<br>Без крепления | Глины, суглинки, супеси, пески, лессы, торфяники в талом состоянии<br>То же и торфяники, лед, гравийно-галечниковые и валунные отложения в мерзлом состоянии; скальные грунты |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | тановления границ водоносного пласта ±1 м и более (при каротаже 0,5—1 м) | дательных скважин; глубина бурения до 100 м и более | | |
| Вращательный колонковый | Получение качественной гидрогеологической информации, фиксация границ водоносных пластов с погрешностью до ±0,1 м | Небольшие диаметры | Преимущественно в скальных породах диаметром 150—200 мм; бурение центральных и наблюдательных скважин | Крепление трубами с промывкой водой<br>Крепление трубами при бурении всухую<br>Без крепления | Сильно-трещиноватые скальные грунты<br>Глины, суглинки, супеси, маловлажные сухие пески, лессы, торфяники, скальные грунты<br>Глины, суглинки, супеси, пески, лессы, торфяники, гравийно-галечниковые и валунные отложения в мерзлом состоянии и скальные грунты |

*Продолжение табл. 4*

| Способы бурения | Преимущества | Недостатки | Рекомендуемые условия применения | Характер крепления стенок скважины | Литологический состав пород и температурное состояние |
|---|---|---|---|---|---|
| Комбинированный (вращательный и ударно-канатный) | Использование преимуществ каждого способа бурения; получение качественной геолого-гидрогеологической информации, возможность оборудования скважины без применения промывочных жидкостей при вскрытии водоносных горизонтов | Соответственно видам бурения | Бурение в районах слабой гидрогеологической изученности; при частом переслаивании водоносных горизонтов и при бурении слабонапорных водоносных горизонтов | Крепление трубами | Рыхлые, связные и скальные грунты |

преждения прорыва напорных вод по затрубному пространству, необходимо предусматривать установку дополнительных обсадных труб. Верхний конец обсадных труб, оставляемых в скважине, или фильтровой колонны при установке впотай должен находиться выше башмака предыдущей колонны не менее чем на 3 м при глубине скважины до 50 м и не менее чем на 5 м при большей глубине. Кольцевой зазор между трубами перекрывается сальником. Изоляция также достигается путем задавливания обсадных труб в глинистые прослои, созданием глиняных или цементных пробок, применением резиновых тампонов специальной конструкции. Выход колонны обсадных труб одного диаметра при многоколонной конструкции скважины составляет 20—40 м.

В рыхлых песках до установки фильтра не следует допускать подработку скважины ниже обсадных труб, особенно при подрусловых откачках.

**2.79.** Оголовок возмущающей скважины монтируется так, чтобы было не сложно регулировать ход откачки (или самоизлива), надежно измерять уровень воды, устьевое давление (при самоизливе) и дебит, отбирать пробы воды на химические анализы, а также спускать в скважину насосное оборудование, приборы для измерения уровня воды, температуры и пр.

Скважина должна быть изолирована от попадания в нее поверхностных вод и атмосферных осадков.

**2.80.** Конструкция наблюдательных скважин на первый от поверхности земли водоносный горизонт оборудуется одной колонной труб с фильтром на конце. В верхней части скважины делается цементный или глинистый замок на глубину до 0,5 м для предупреждения загрязнения водоносного горизонта поверхностными водами. Верхний конец колонны рекомендуется оборудовать запирающимся оголовком.

Если наблюдательные скважины большей глубины, то конструкция их должна предусматривать изоляцию всех неисследуемых вышележащих водонасыщенных грунтов путем спуска обсадной колонны до кровли водоупорных грунтов и установки фильтра впотай.

При залегании исследуемых рыхлых грунтов на глубине 10—15 м скважины можно оборудовать без предварительной проходки, используя забивные пьезометры. Рабочая часть фильтров этих пьезометров, установленных на бурильных трубах, состоит из перфорированной трубы длиной 0,5 м, обтянутой сеткой с заостренным наконечником, который должен быть несколько шире фильтра.

## 3. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

### Фильтры

**3.1.** При устройстве гидрогеологических скважин в неустойчивых породах они оборудуются фильтрами, которые должны обеспечивать свободный доступ воды в скважину, надежно защищать ее от пескования при минимальных гидравлических потерях, обеспечивать устойчивую работу в течение длительного испытания.

Бесфильтровые конструкции скважин рекомендуется применять в устойчивых скальных и нескальных грунтах, а также в рыхлых грунтах в напорных водоносных пластах при устойчивой кровле.

**3.2.** Установка фильтра в скважину при решении основной задачи (отбора воды без механических примесей) приводит и к ряду неблагоприятных явлений, связанных с появлением в призабойной зоне дополнительного гидравлического сопротивления, которое в разной степени, в зависимости от соответствия применяемой конструкции гидрогеологическим условиям, искажает параметры водоносного пласта или истинную производительность скважины, и получаемые характеристики могут в значительной степени определяться параметрами прифильтровой зоны и самого фильтра. Поэтому при выборе типа и конструкции фильтра необходимо ориентироваться на такие решения, при которых проницаемость фильтра и прифильтровой зоны превышала бы пластовую. Это в равной степени важно для всех типов скважин: эксплуатационных (водозаборных, дренажных, водопонизительных), разведочных, опытных и наблюдательных.

**3.3.** Гидравлические исследования различных конструкций фильтров показывают, что основные потери напора приходятся на контактную зону между каркасом (водоприемную поверхность) и гравийной обсыпкой (водовмещающей породы). С учетом этого фактора и принципа наложения гравия и пород на водоприемную поверхность фильтра их можно подразделить следующим образом (рис. 16).

**3.4.** Фильтрационные характеристики различных конструкций изменяются в значительных пределах и оказываются максимальными для проволочных фильтров. Темп увеличения коэффициента водопроницаемости фильтра от его скважности также наиболее значителен у этих конструкций фильтров. В то же время проницаемость сетчатых фильтров соизмерима с фильтрационными характеристиками пластов и, очевидно, что при неправильном подборе фильтра и неизбежной кольматации водоприемной поверхности в ходе откачки возможно формирование относительно слабопроницаемой прослойки в зоне контакта водоприемной поверхности фильтра и породы (проявление скин-эффекта). Применение многослойных модификаций фильтров, сочетающих каркас, проволочную обмотку, сетку, или много-

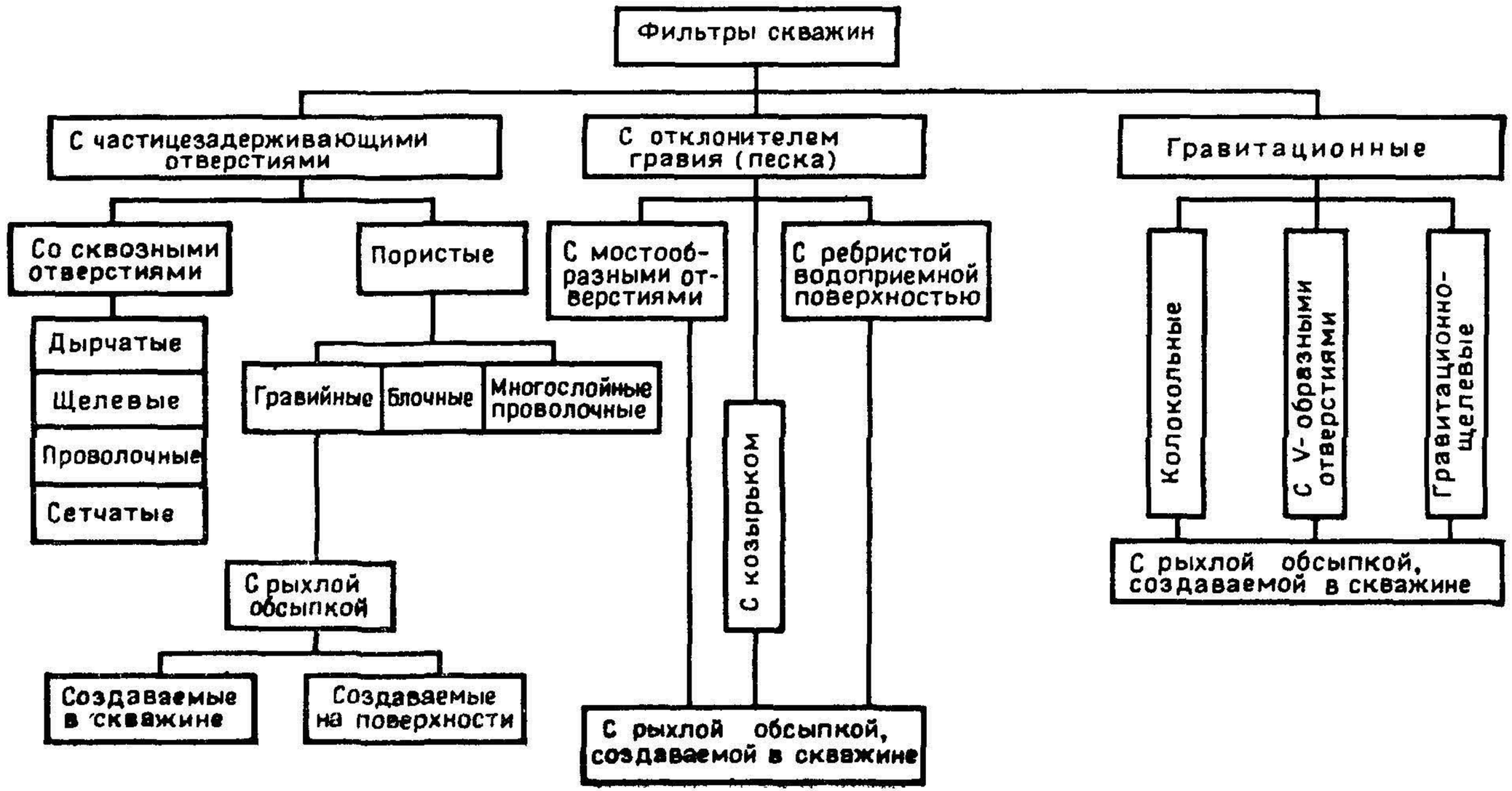



Рис. 16. Классификация фильтров

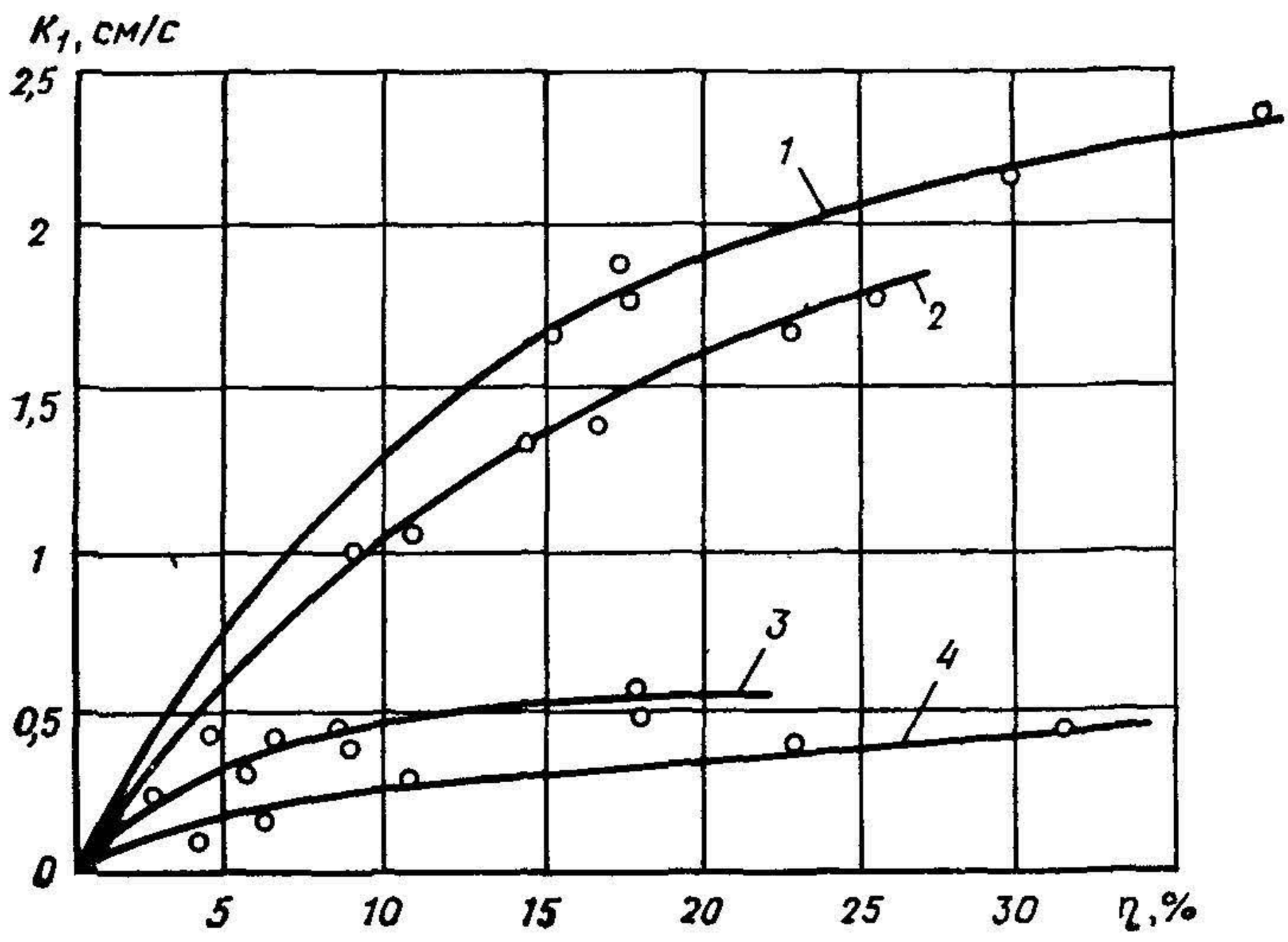



Рис. 17. Зависимость коэффициента водопроницаемости фильтров от скважности для

*1* — каркасно-стержневых конструкций; *2* — проволочных фильтров на трубчатом каркасе; *3* — фильтров из штампованного листа; *4* — сетчатых фильтров

слойных проволочных (сетчатых) конструкций, как правило, приводит к снижению водопроницаемости конструкции. Так, коэффициент водопроницаемости трехслойного проволочного фильтра определился равным 0,14 см/с, что сравнимо с параметрами сетчатого фильтра при скважности 4—5 %. Коэффициент фильтрации блочных пористобетонных конструкций при индикаторных исследованиях при разном заполнителе составил соответственно 0,04 и 0,007 см/с.

Данные о закономерностях изменения коэффициента фильтрации наиболее распространенных типов фильтра: каркасно-стержневых и трубчатых с проволочной обмоткой, конструкций с водоприемной поверхностью из штампованного листа и с сетками галунного плетения[1] приведены на рис. 17.

**3.5.** При оборудовании гидрогеологических скважин фильтрами не всегда удается обеспечить подбор высокопроницаемого фильтра и предотвратить пескование скважин в ходе откачки. Конструктивное решение этой проблемы заключается в подборе гравийной или гравий-

[1] При применении фильтров с дополнительной водоприемной поверхностью расчетная скважность их равна произведению скважности каркаса на скважность дополнительной водоприемной поверхности.

но-песчаной обсыпки (одно- или двухслойной), являющейся переходным слоем между фильтром, каркасом и породой, чаще всего водоносным песком. Обсыпку подбирают, исходя из задания коэффициента межслойности $D_{50}/d_{50} \approx 8—12$ (здесь $d_{50}$ и $D_{50}$ — средний диаметр соответственно водоносных пород и материала обсыпки). Если обсыпка двухслойная, то отношение средних диаметров двух слоев обсыпки должно быть близко к 5.

При установке фильтра с гравийной обсыпкой обнажение фильтра следует производить постепенно, поднимая каждый раз колонну обсадных труб на 0,5—0,6 м после засыпки в скважину слоя гравия 0,8—1 м по высоте (ГОСТ 23278—78). Верхняя граница обсыпки должна быть выше верха водоприемной части фильтра. Толщина гравийной обсыпки должна составлять не менее 50 мм.

В песчаных и гравийных грунтах, в которых содержание фракций до 0,5 мм не превышает 10 % по весу, применять гравийную обсыпку не следует (ГОСТ 23278—78).

**3.6.** В практике инженерных изысканий для строительства наибольшее распространение имеют фильтры со сквозными отверстиями (дырчатые, щелевые, проволочные, сетчатые) с рыхлой обсыпкой или без обсыпки.

Область применения этих фильтров ограничена соответствующими гидрогеологическими условиями, но они все должны отвечать следующим требованиям:

конструкция и материал фильтров должны обеспечивать его прочность и коррозионную стойкость, а также многократное его применение;

условия прохождения воды через фильтр должны приближаться к условиям фильтрации в пласте; скважность водоприемной поверхности возмущающих скважин в кусте и одиночных должна отвечать фильтрационным свойствам пласта и рекомендуется ее принимать в пределах 10—20 %.

Скважность фильтров наблюдательных скважин в кусте рекомендуется принимать не менее 5 %.

**3.7.** Дырчатые и щелевые фильтры рекомендуется применять в щебнистых и гравийно-галечных отложениях с песчаным заполнителем до 20 % по весу, а также в сильно трещиноватых не устойчивых в стенках скважины скальных грунтах. Размеры отверстий необходимо определять по гранулометрическому составу исследуемых грунтов или обсыпки (табл. 5). В случае когда эти фильтры являются каркасом для обмотки его проволокой или сеткой, диаметр отверстий рекомендуется принимать в зависимости от диаметра трубы от 10 до 25 мм, а ширину щели 10—30 мм.

В табл. 6 приведены рекомендуемые число и количество круглых отверстий диаметром 10 мм для отдельных диаметров труб.

Таблица 5

| Фильтр | Размеры отверстий фильтров, мм. Степень неоднородности грунтов | |
|---|---|---|
| | $u = d_{60}/d_{10} \leq 2$ | $u = d_{60}/d_{10} > 2$ |
| Дырчатый | (2,5—3) $d_{50}$ | (3—4) $d_{50}$ |
| Щелевой | (1,25—1,5) $d_{50}$ | (1,5—2) $d_{50}$ |
| Сетчатый | (1,5—2) $d_{50}$ | (2—2,5) $d_{50}$ |
| С проволочной обмоткой | 1,25 $d_{50}$ | 1,5 $d_{50}$ |

Примечание. $d_{10}$, $d_{50}$, $d_{60}$ — определяются по кривой гранулометрического состава.

3.8. Фильтры с проволочной обмоткой рекомендуется применять в гравийных грунтах, песках и гравийно-галечных грунтах с заполнителем свыше 20 %. Для обмотки рекомендуется применять мягкую проволоку из нержавеющей стали диаметром 1,5—3 мм (ГОСТ 5632—72 с изм.). Ширину просвета между витками рекомендуется принимать в зависимости от степени неоднородности грунтов по

Таблица 6

| Диаметр трубы, мм | Диаметр отверстий, мм | Число отверстий в ряду по окружности | Число рядов отверстий на 1 м трубы | Расстояние между центрами отверстий, мм | | Скважность, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | по окружности | по длине трубы | |
| 100 | 10 | 16 | 60 | 22 | 17 | 20 |
| 150 | 10 | 23 | 60 | 22 | 17 | 22 |
| 200 | 10 | 28 | 60 | 23 | 17 | 19 |
| 250 | 10 | 36 | 60 | 23 | 17 | 20 |

Таблица 7

| Наружный диаметр, мм | Толщина стенок, мм | | | | Наружный диаметр, мм | Толщина стенок, мм | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | л | сл | с | т | | л | сл | с | т |
| 63 | 2 | 2,5 | 3,6 | 5,7 | 160 | 3,9 | 6,2 | 9,1 | 14,6 |
| 75 | 2 | 2,9 | 4,3 | 6,8 | 180 | 4,4 | 7,0 | 10,2 | 16,4 |
| 90 | 2,2 | 3,5 | 5,1 | 8,2 | 200 | 4,9 | 7,7 | 11,4 | 18,2 |
| 110 | 2,7 | 4,8 | 6,2 | 10,0 | 250 | 6,1 | 9,7 | 19,2 | 22,8 |
| 125 | 3,1 | 4,8 | 7,1 | 11,4 | 315 | 7,7 | 12,2 | 17,9 | — |
| 140 | 3,5 | 5,4 | 7,9 | 12,7 | | | | | |

табл. 5. Ориентировочная ширина просвета между витками проволоки для песков составляет: для мелких — 0,3—0,5 мм; для средних — 0,5—0,7 мм; для крупных — 0,7—1,0 мм.

**3.9.** Сетчатые фильтры применяются в песках, супесях, суглинках, торфах и гравийных грунтах с песчаным заполнителем свыше 30 %. Как правило, сетчатые фильтры следует применять с песчаной или гравийной обсыпкой зафильтрового пространства (см. п. 3.5).

Сетки применяются металлические квадратного (ГОСТ 8187—80) и галунного (ГОСТ 6613—73 с изм.) плетения, реже киперного, а также винипластовые штампованные и из стеклоткани.

Для крупных песков и гравийных грунтов с песчаным заполнителем более 30 %, а также плохоразложившихся торфов рекомендуется применять сетки квадратного плетения и винипластовые. Для мелких и средних песков, супесей, суглинков, торфов рекомендуется применять сетки галунного плетения, винипластовые в 2—3 слоя. Сетки из стеклоткани рекомендуется использовать для пылеватых песков, супесей, суглинков.

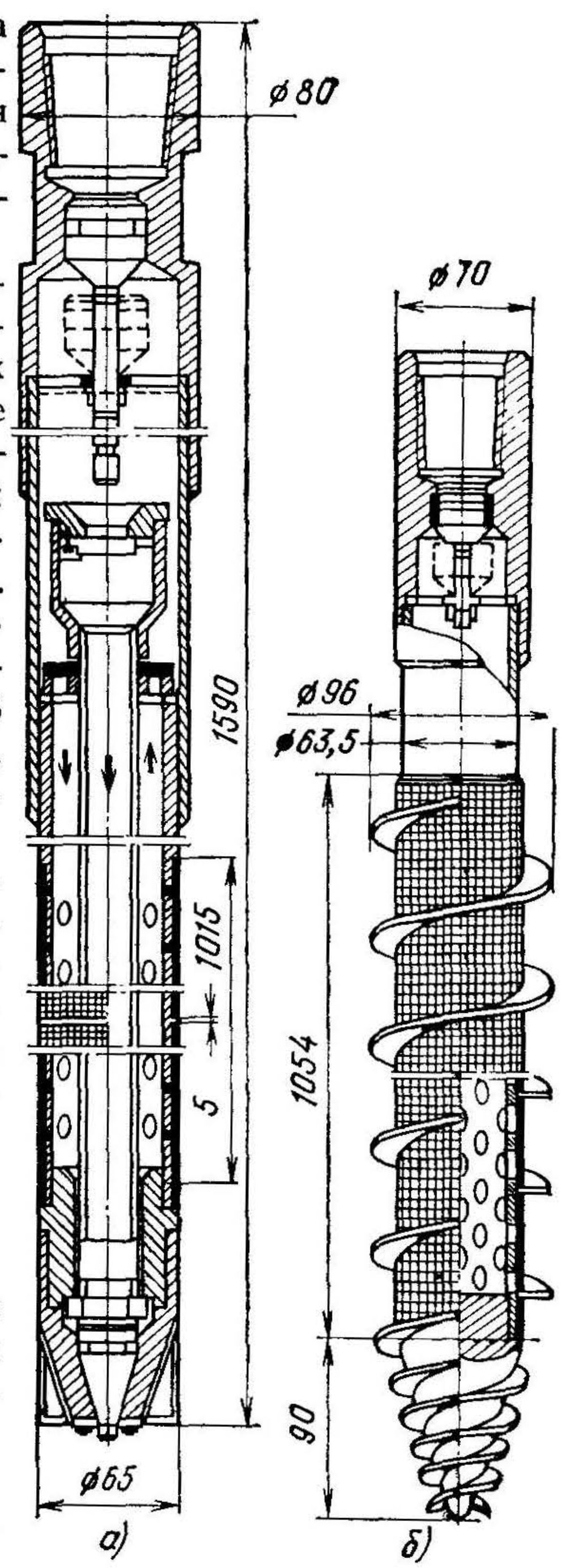



Рис. 18. Фильтры-опробователи
*а* — промывочный; *б* — шнековый

**3.10.** При изысканиях для строительства рекомендуется шире применять неметаллические трубы, в том числе полиэтиленовые (ГОСТ 18599—83, ГОСТ 539—80, ТУ МХП 6-05-1573-72), которые обладают высокой прочностью, легки и удобны в обращении, хорошо поддаются обработке, не разрушаются в высокотемпературных и агрессивных средах.

Промышленностью полиэтиленовые трубы диаметром свыше

Таблица 8

| Наружный диаметр, мм | Толщина стенок, мм | | | | Наружный диаметр, мм | Толщина стенок, мм | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | л | сл | с | т | | л | сл | с | т |
| 63 | 3,0 | 4,7 | 6,7 | 10,5 | 125 | 6,0 | 9,3 | 13,4 | 20,8 |
| 75 | 3,6 | 5,6 | 8,0 | 12,5 | 140 | 6,7 | 10,4 | — | — |
| 90 | 4,3 | 6,7 | 9,6 | 15,0 | 160 | 7,7 | 11,9 | — | — |
| 110 | 5,2 | 8,1 | 11,8 | 18,3 | | | | | |

63 мм выпускаются длиной 6, 8, 10 и 12 м (ГОСТ 18599—83). В табл. 7 приведены диаметры и толщина стенок труб из полиэтилена низкого давления, а в табл. 8 — высокого давления.

**3.11.** При использовании метода опережающего гидрогеологического опробования применяются два типа фильтров: промывочный и шнековый (рис. 18).

## Водоподъемники

**3.12.** При выборе типа и марки водоподъемников для производства опытных откачек с целью определения фильтрационных характеристик грунтов необходимо учитывать:

предполагаемый дебит скважины, положение статического уровня воды;

глубину динамического уровня воды в скважине при максимальном понижении;

режим фильтрации, при котором производится откачка (установившийся, неустановившийся, с постоянным расходом или понижением уровня);

продолжительность и вид откачек;

физические и химические свойства откачиваемой воды.

Внутренний диаметр фильтра должен допускать свободный монтаж и демонтаж насоса, а также установку контрольно-измерительной аппаратуры в скважине.

**3.13.** Для производства откачек из скважин выделяют две основные группы водоподъемников:

поверхностные (горизонтальные) с высотой всасывания до 8 м;

глубинные (вертикальные) насосы, откачивающие воду с глубин более 8 м.

Технические характеристики насосов приведены в соответствующих справочниках.

**3.14.** Наиболее универсальными водоподъемниками, которыми можно откачивать воду с большим процентным содержанием механических примесей из скважин широкого диапазона диаметров, являются эрлифты. Комплект эрлифтной установки состоит из компрес-

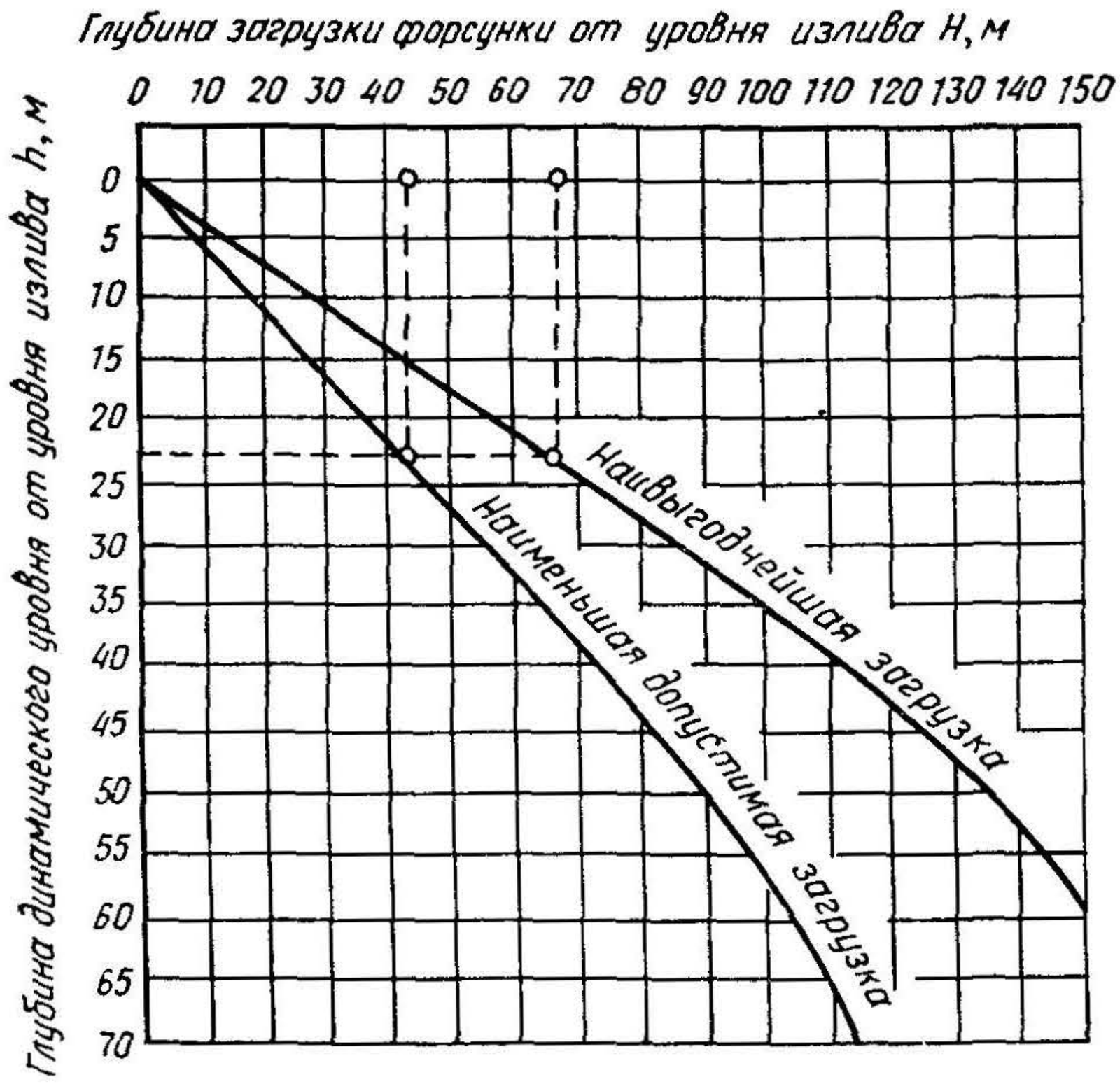



Рис. 19. График зависимости загрузки смесителя от положения динамического уровня

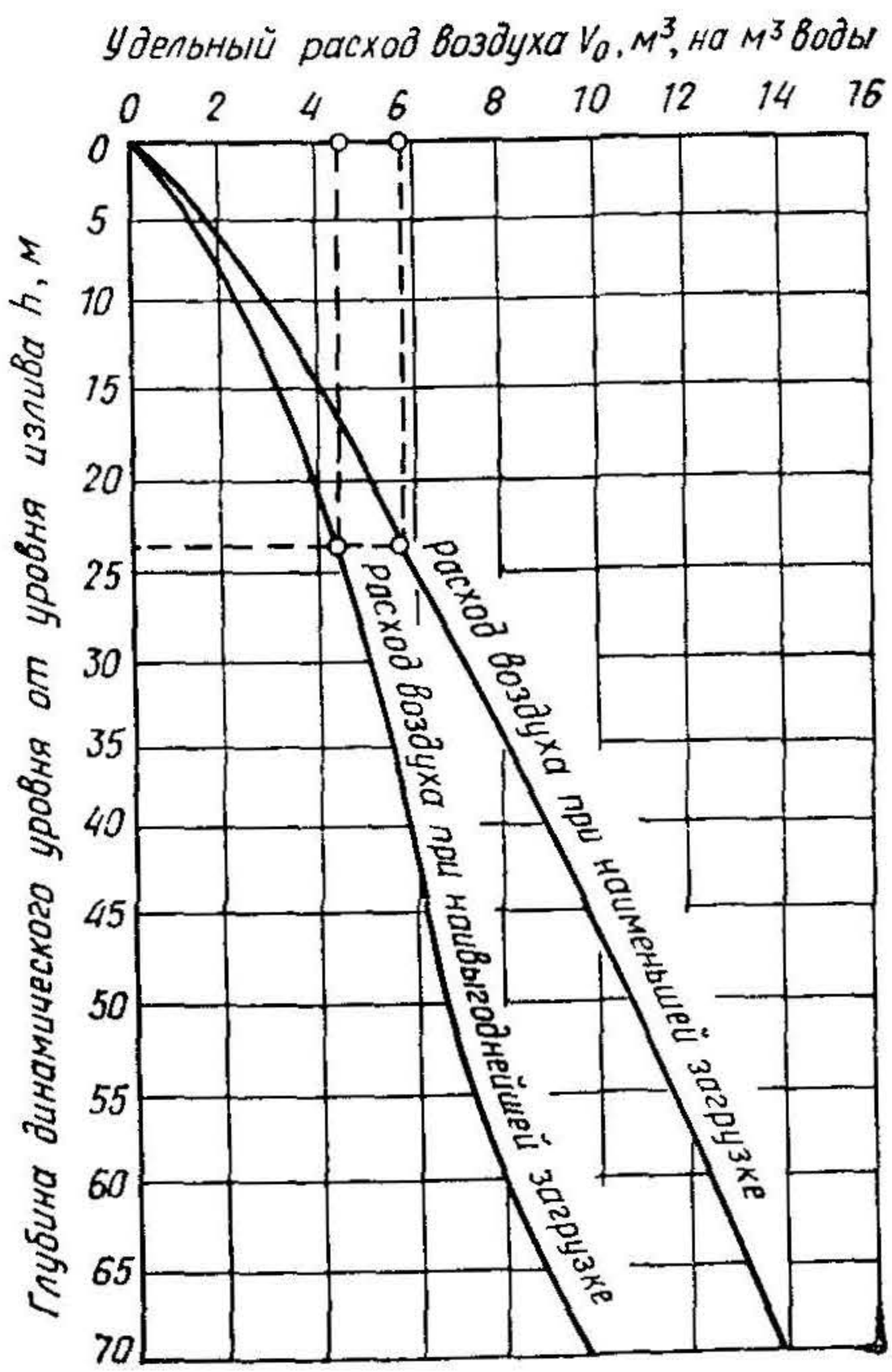



Рис. 20. График зависимости удельного расхода воздуха от положения динамического уровня

сора (в основном передвижного), оголовка колонны, водо- и воздухопроводных труб и форсунки.

Глубина погружения форсунки под динамический уровень воды в скважине определяется по формуле

$$L = kh,$$

| Условия работы эрлифта | Отношение глубины динамического уровня сме | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.2,5 | | | | | |
| | Динамический уро | | | | | |
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 20 |
| Глубина погружения смесителя от уровня излива воды, м | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 40 |
| Глубина погружения водоподъемных труб от уровня излива воды, м | 28 | 53 | 79 | 103 | 128 | 43 |
| Минимальная глубина скважины, м | 33 | 58 | 84 | 110 | 135 | 48 |
| Рабочее (избыточное) давление воздуха в воздухопроводной трубе у смесителя, МПа | 0,15 | 0,30 | 0,45 | 0,60 | 0,75 | 0,20 |
| Удельный расход воздуха, м³ на 1 м³ воды | 3,00 | 3,81 | 4,66 | 5,41 | 6,15 | 5,43 |
| Расход воздуха, м³/мин, и электроэнергии, кВт[1], для подачи воды, м³/ч: | | | | | | |
| 5 | 0,25/0,92 | 0,32/1,3 | 0,38/2,10 | 0,42/2,83 | 0,50/3,86 | 0,43/1,5 |
| 10 | 0,50/1,84 | 0,63/2,80 | 0,75/4,25 | 0,84/5,60 | 1,00/7,73 | 0,86/3,00 |
| 20 | 1,00/3,68 | 1,26/5,60 | 1,50/8,50 | 1,70/11,20 | 2,00/15,45 | 1,72/6,0 |
| 30 | 1,50/5,40 | 1,90/8,20 | 2,30/12,73 | 2,52/17,0 | 3,00/23,2 | 2,60/9,0 |
| 50 | 2,50/9,00 | 3,15/14,0 | 3,75/21,5 | 4,20/28,5 | 5,00/38,65 | 4,30/15,0 |
| 100 | 5,00/18,0 | 6,30/28,0 | 7,50/43,0 | 8,4/57,0 | 10,0/77,0 | 8,60/30,0 |

[1] В числителе указан расход воздуха, в знаменателе — электроэнергии.

Таблица 9

| от уровня излива воды к глубине погружения сителя | | | | | | | Рекомендуемые диаметры труб (диаметр условного прохода), мм, для откачки эрлифтом при расположении в скважине | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1:2,0 | | | | 1:1,66 | | | | | | |
| вень (от уровня излива), м | | | | | | | «внутри» | | «рядом» | |
| 30 | 40 | 50 | 60 | 45 | 55 | 70 | водоподъемных | воздухопроводных | водоподъемных | воздухопроводных |
| 60 | 80 | 100 | 120 | 74,7 | 91,3 | 116,2 | | | | |
| 63 | 83 | 103 | 123 | 77,7 | 94,3 | 119,2 | | | | |
| 68 | 88 | 110 | 130 | 83 | 100 | 120 | | | | |
| 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,30 | 0,36 | 0,46 | | | | |
| 6,46 | 7,50 | 8,35 | 9,15 | 11,76 | 13,20 | 14,61 | | | | |
| 0,53 / 2,5 | 0,63 / 3,4 | 0,68 / 4,1 | 0,70 / 5,5 | 0,97 / 4,30 | 1,10 / 5,25 | 1,25 / 8,8 | 40 | 15 | 32 | 15 |
| 1,10 / 5,00 | 1,26 / 6,80 | 1,36 / 8,40 | 1,60 / 13,00 | 1,95 / 8,60 | 2,16 / 10,50 | 2,50 / 17,60 | 50 | 20 | 40 | 20 |
| 2,12 / 10,0 | 2,52 / 13,6 | 2,70 / 16,8 | 3,35 / 26,0 | 3,90 / 17,2 | 4,32 / 21,0 | 5,0 / 35,0 | 80 | 20—25 | 70 | 20 |
| 3,20 / 15,0 | 3,80 / 20,0 | 4,00 / 25,0 | 4,20 / 33,0 | 5,84 / 26,0 | 6,48 / 31,5 | 7,50 / 53,0 | 100 | 25 | 70 | 20 |
| 5,30 / 25,0 | 6,30 / 33,4 | 6,70 / 42,0 | 7,2 / 55,0 | 9,74 / 43,2 | 10,8 / 52,5 | 12,5 / 88,0 | 125 | 25—32 | 100 | 25 |
| 10,6 / 50,0 | 12,6 / 68,0 | 13,4 / 84,0 | 14,5 / 110,0 | 19,5 / 86,0 | 21,6 / 105,0 | 25,0 / 176,0 | 200 | 50 | 157 | 40 |

где $h$ — глубина динамического уровня от излива воды; $k$ — коэффициент, равный отношению глубины погружения форсунки к высоте подъема воды, изменяется в пределах 1,4—3,0.

Для расчета оптимальных значений глубины погружения форсунки рекомендуется принимать $k=1,6—2,0$ (большие значения $k$ ведут к неоправданному увеличению глубины скважины при малом приращении дебита). Глубина скважины должна быть больше на 5—10 м глубины погружения форсунки (смесителя). Смеситель должен иметь перфорацию и находиться выше рабочей части фильтра. Рекомендуется принимать глубину загрузки форсунки по графику (рис. 19). На рис. 20 приведен график зависимости удельного расхода воздуха от глубины динамического уровня.

Для проведения откачек применяются две системы монтажа эрлифтных труб: центральная («внутри), когда воздухопроводные трубы помещаются внутри водоподъемных, и параллельная («рядом»), когда воздухопроводные трубы расположены вне водоподъемных. Расчетные характеристики приведены в табл. 9.

**3.15.** Для производства опытных откачек из малодебитных скважин рекомендуются штанговые насосы (при глубине динамического уровня 5—50 м и более), ленточные водоподъемники и водоструйные установки. Также рекомендуется использовать метод тартания с помощью желонки, оборудованной тарельчатым клапаном и специальной пикой, обеспечивающей разгрузку желонки без опрокидывания.

## Измерительные приборы

**3.16.** Измерительные устройства и приборы должны обеспечивать измерения дебита скважин с погрешностью не более 5 %, а уровня воды в скважинах на глубинах до 10 м — с точностью до 1 см, на глубинах св. 10 м—с погрешностью 0,1 % (ГОСТ 23278—78).

**3.17.** Измерения уровней воды в возмущающих и наблюдательных скважинах следует производить уровнемерами, опускаемыми в скважины на не изменяющихся в длине при намокании в натяжении тросах. Запрещается использовать в качестве троса веревки, бумажные шпагаты, полотняные сантиметры, хлопчатобумажные рулетки.

**3.18.** Рекомендуется использовать для замера уровней уровнемеры (хлопушки) с рулеткой заводского изготовления марок РС-20, Р-50 и ГГП-125, электроуровнемеры заводского изготовления марок УЗ-50, УЗ-75, УЗ-200, ЭВ-1м. Также рекомендуется применять уровнемеры типа УА, разработанные ВСЕГИНГЕО, которые могут эксплуатироваться в экстремальных температурных условиях. Наиболее надежны и просты в обращении поплавковые уровнемеры, которые рекомендуется использовать в скважинах большого диаметра и при

глубине уровня в них до 25 м. Промышленностью выпускается поплавковый уровнемер марки УБ-1.

Широкое применение должны найти самописцы, а также приборы с дистанционным управлением.

**3.19.** Измерения дебита скважин в практике инженерных изысканий производятся мерными емкостями, водомерами, водосливами.

Измерение дебита мерными емкостями производится через определенные промежутки времени — фиксируется время наполнения мерного сосуда. Рекомендуется подбирать мерные емкости таким образом, чтобы они заполнялись не быстрее 30 сек и не дольше 4 мин. При больших расходах рекомендуется использовать металлические емкости объемом 1—2 м³. Перед производством откачки емкости должны быть протарированы. Рекомендуется устанавливать в емкости рейку с делениями через 1—5 см с целью последовательного разового отсчета. Время наполнения мерной емкости замеряется секундомерами. Шланг, подающий воду в емкость, не должен иметь заметных перегибов, а для избежания сильной ряби на поверхности воды в емкость следует класть свободно плавающие деревянные (фанерные) щитки. Для измерения малых дебитов рекомендуется использовать ведра, бачки.

**3.20.** Наиболее точно показания дебита скважин дают водомеры, которые фиксируют непрерывный (суммарный) расход воды. Промышленность выпускает много различных типов водомеров, из них рекомендуется использовать водомеры марок СХВК и ВВ. Погрешность измерения ими расхода не более 2 %. Водомерами измеряются в основном мало- и среднедебитные скважины.

**3.21.** В практике инженерных изысканий имеет также широкое применение способ замера дебита посредством лотка с водосливом.

Водосливы устраивают прямоугольного и треугольного сечения или в виде трапеции.

Расход воды на водосливе прямоугольного сечения равен

$$Q = 1,8bh\sqrt{h}, \tag{8}$$

где $b$ — ширина водослива, см; $h$ — высота уровня воды перед водосливным ребром, см.

Расход воды для треугольного сечения

$$Q = 1,4h^2\sqrt{h}. \tag{9}$$

Расход воды для трапеции

$$Q = 1,86bh\sqrt{h}. \tag{10}$$

**3.22.** Для измерения расхода загрязненных жидкостей, сильноминерализованных вод рекомендуется прибор ГГП-40, позволяющий

производить регистрацию как дебита, так и понижения в возмущающей скважине. Регистрация производится самописцем. Прибор разработан Мингео СССР.

**3.23.** Технические характеристики измерительных приборов приведены в Справочнике по приборам и оборудованию для инженерных изысканий.

## 4. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

### Подготовка к откачке

**4.1.** Для получения удовлетворительных результатов откачки большое значение имеет подготовка скважины к испытанию, в результате которой должно быть сведено к минимуму сопротивление прифильтровой зоны и исключено вертикальное движение воды по стволу скважины.

Подготовка к откачке заключается в чистке скважины от шлама или ее разглинизация, подборке и установке фильтров, нивелировке нулевых (замерных) точек, замерах уровней воды, монтаже водоподъемного оборудования, устройстве отвода откачиваемой воды, прокачке скважины.

**4.2.** Размещение и длина фильтров (интервалов опробования) уточняются после бурения скважин. При кустовых откачках интервалы опробования уточняются по результатам проходки первой наблюдательной скважины. В случае замещения водопроницаемых пород водоупорными необходимо своевременно перенести возмущающую или наблюдательную скважину или куст в целом.

После проходки центральной и первой наблюдательной скважин куста рекомендуется проводить прокачку из центральной скважины, по результатам которой следует уточнить намеченные проектом расстояния наблюдательных скважин от центральной.

**4.3.** Чистку скважины от шлама следует производить путем промывки, желонирования или кратковременной прокачки скважины. Для очистки скважины от шлама и глинистого материала в скальных породах применяют свабирование (см. п. 4.4).

**4.4.** При бурении скважин с глинистым раствором следует перед испытанием произвести тщательную ее разглинизацию (ГОСТ 23278—78). Наиболее качественным способом разглинизации грунтов в прифильтровой зоне с незначительной затратой времени (2—3 ч) на процесс деглинизации после проходки скважин в различных грунтах (пески, супеси, суглинки, лессы, торф, скальные породы) является обратновсасывающая промывка через окна, расположенные на фильтровой колонне. Промывка может осуществляться эрлифтом, реже желонированием. В случае малых водопритоков в скважину

по специальным трубам подают воду. Создаваемый в начале откачки перепад давлений на урезе промывочных окон вызывает обрушение глинистой корки со стенок скважины или самих стенок, сложенных рыхлыми грунтами. Обрушенная глинистая корка перемещается вниз вдоль фильтра и удаляется вместе с глинистым раствором через внутреннее сечение фильтровой колонны. По окончании процесса разглинизации промывочные окна перекрываются кольцами, устанавливаемыми внутри или снаружи фильтровой колонны. Недостатком способа является малая эффективность процесса разглинизации при длине фильтровой колонны более 6 м.

**4.5.** Эффективным способом, обеспечивающим качественное восстановление проницаемости стенок скважины и поверхности фильтра, является комбинированный способ разглинизации, который рекомендуется применять в скважинах, пройденных в песках, супесях, суглинках, лессах, торфах, скальных породах.

Процесс разглинизации заключается в последовательном применении обратновсасывающей промывки через окна (описанный ранее) и промывки фильтра чистой водой с помощью гидравлического ерша. Гидравлический ерш представляет собой отрезок перфорированной трубы длиной 0,8—1 м, имеющий снизу и сверху резиновые манжеты по внутреннему диаметру фильтровой колонны, позволяющие сконцентрировать промывочную воду на ограниченном участке фильтра. В скважину ерш опускается на трубах, по которым одновременно подается вода. В процессе разглинизации ерш перемещается по всей длине фильтра.

**4.6.** Разглинизацию методом прокачки скважин насосом или эрлифтом рекомендуется применять в трещиноватых скальных породах и в грунтах с высокой водоотдачей. Перед прокачкой скважина промывается водой, после чего производится прокачка с производительностью, обеспечивающей максимальный перепад давлений. Для повышения эффективности прокачка периодически останавливается, что позволяет создавать так называемые гидравлические удары в зоне фильтра. Процесс разглинизации ведется до полного осветления выходящей воды и прекращения выноса шлама и песка.

Недостатком способа является удаление продуктов кольматации через рабочую поверхность, что ведет к ее загрязнению.

**4.7.** Для восстановления проницаемости прифильтровой зоны скважины в грунтах, представленных трещиноватыми скальными породами, рекомендуется применять методы свабирования и желонирования. Сущность способа заключается в перемещении вниз и вверх поршня-сваба внутри эксплуатационной колонны. Сваб представляет собой металлический диск с резиновым клапаном. При ходе сваба вверх давление в трубах под свабом снижается, что вызывает приток воды в скважину и обрушение глинистой корки со стенок сква-

жины. При ходе сваба вниз клапан открывается, и глинистый раствор проходит в пространство над свабом. Сваб опускают в скважину на бурильных трубах, его рабочий ход может достигать нескольких десятков метров.

Качественную наружную разглинизацию прифильтровой зоны обеспечивает применение сваба-желонки, представляющей собой желонку с резиновыми манжетами по наружному диаметру. Внутри желонки смонтирован шариковый клапан с пружиной, регулирующий столб жидкости для подъема.

Недостатком способа является большая длительность работ.

**4.8.** Рекомендуется также вибрационный способ освоения скважин вибраторами ВУР-2 и ВУР-3 или установками АВО-1 и АВО-2, укомплектованными этими вибраторами, а также сочетание вибрационного и реагентного воздействия соляной кислоты или порошкообразного гидразинонатрия [30].

После чистки скважины или ее разглинизации обязательно проводятся наблюдения за восстановлением уровня воды.

**4.9.** Перед установкой фильтров и тампонов производятся замеры уровней воды и контрольные замеры глубин скважин. Если при замере глубины скважины выявляется наличие ее заиленности или пробки, то чистка (прокачка) скважины повторяется.

**4.10.** Фильтр перед спуском в скважину должен быть тщательно проверен и хорошо промыт. Перед установкой фильтра необходимо убедиться в том, что рабочая часть фильтра будет установлена в строго намеченном интервале опробования. Решающим фактором в получении желаемого успеха при ведении откачки является подбор сеток с учетом конкретного геологического разреза.

**4.11.** При монтаже насосного оборудования следует тщательно проверить чистоту и целостность стенок шлангов, а также надежность их соединений.

**4.12.** Тампон, изолирующий интервал скважины, опробуемый откачкой, устанавливается в тех местах скважины, где ее стенки не имеют больших трещин и каверн; в связи с этим в поисках наиболее сохранных участков тампон приходится несколько раз передвигать выше или ниже по скважине. При спуске тампона, фильтра и прифильтрового пьезометра в скважину должна быть обеспечена герметичность соединений колонны труб. Башмак колонны обсадных труб должен быть расположен не выше 1 м над верхом рабочей части фильтра (ГОСТ 23278—78).

**4.13.** Для контроля работы фильтра при откачке воды из одиночной скважины полезно иногда у фильтра устанавливать прифильтровой (привязной) пьезометр. Диаметр пьезометра должен быть не более 78 мм, а длина равна длине рабочей части фильтра скважины, если она не превышает 5 м. При большей длине рабочей

части фильтра рабочая часть пьезометра должна иметь длину не менее 5 м.

**4.14.** Насосное оборудование должно быть подобрано, исходя из величин требуемых дебитов и понижений.

При использовании поверхностных насосов следует иметь в виду, что если глубина уровня воды в скважине невелика, не больше 4—5 м, то насосы необходимо помещать в шурфе, устраиваемом непосредственно у скважины.

**4.15.** Отвод откачиваемой воды должен осуществляться по трубам или лоткам на расстояние, исключающее возможность ее влияния на результаты опыта. Обычно воду отводят на расстояние не менее 100 м от места проведения опыта. Сбрасывать воду следует ниже по течению грунтового потока или в водоем.

**4.16.** Для защиты от непогоды, а также хранения измерительных приборов и бутылок для воды, на расстоянии 30—50 м от скважины следует устанавливать передвижной вагончик или палатку (будку), где помещается стол для вычерчивания графиков, производства необходимых вычислений и заполнения журнала испытаний.

**4.17.** После оборудования скважин фильтрами устраиваются нулевые точки (верх обсадных труб или фильтров, специальный брус с гвоздем и пр.), от которых в процессе испытания ведутся все замеры уровней. Одновременно устанавливается рейка на близраспоположенном водоеме (водотоке).

**4.18.** До начала испытания производится проверка всех измерительных приборов и оборудования. При необходимости производится тарировка измерительных приборов (емкости, рулетки, мерной рейки и пр.).

**4.19.** Сведения о нулевой точке, оборудовании скважины, о применяемых приборах и их тарировке и т. д. должны быть зафиксированы в журнале испытаний до начала откачки, а также до начала откачки должны быть вписаны замеренные уровни воды в скважинах и водоеме (водотоке).

**4.20.** После завершения всех подготовительных работ производится прокачка скважины до полного осветления откачиваемой воды. Длительность прокачки должна быть не менее 2 ч (ГОСТ 23278-78).

Прокачка скважин в рыхлых грунтах производится погружением насоса или его всасывающего патрубка до максимально возможной глубины с постепенным увеличением расхода воды до постоянной его величины. В скальных и полускальных породах прокачку следует проводить при максимальном понижении и переменном режиме работы насоса (с частыми остановками), что позволяет интенсифицировать очистку скважины от шлама. Прокачка считается законченной, когда прекращается пескование скважины и откачивае-

мая вода становится совершенно светлой. После прекращения прокачки следует провести наблюдения за восстановлением уровня до статического.

Прокачка должна документироваться в журнале откачки. По результатам прокачки уточняют дебит и величину понижения при испытании, а также расстояния наблюдательных скважин до центральной.

Прокачка возмущающей скважины позволяет уточнить подбор соответствующего насосно-силового оборудования, мерной емкости или водомеров для проведения испытания.

**4.21.** В целях проверки работы фильтров наблюдательных скважин следует из каждой наблюдательной скважины произвести экспресс-откачку (прокачку или тартание) с отбором воды не менее 3 ее объемов, содержащейся в скважине, с последующим наблюдением за восстановлением уровня в них до статического. Если восстановление уровня происходит замедленно и прекращается, не достигнув статического (что может быть установлено посредством подлива в скважину небольшого количества чистой воды), то скважина должна вновь промываться и прокачиваться.

## Производство откачки

**4.22.** В полевых подразделениях перед началом проведения откачки исполнителям выдается задание на производство испытания (входит в состав полевого журнала), которое составляется на основе программы (проекта) изысканий. В задании указывается цель испытания, способ подготовки скважин, интервал установки рабочей части фильтра (интервал опробования), режим откачки, продолжительность, ориентировочная величина дебита (или понижения), частота и последовательность замеров и наблюдений, место отвода воды, время отбора проб воды, частота наблюдения за восстановлением уровня после прокачки и по окончании откачки.

В задании рекомендуется указывать тип водоподъемника и глубину его загружения в скважину, а также способ изоляции водоносных горизонтов.

**4.23.** В зависимости от гидрогеологических условий и от продолжительности испытания откачки могут быть проведены:

при неустановившемся режиме фильтрации, когда гидродинамические характеристики фильтрационного потока (напоры, скорости, расходы) изменяются со временем;

при квазистационарном режиме, при котором распределение напоров и других гидродинамических характеристик в потоке является близким к установившемуся; депрессионные кривые уровня воды,

созданные откачкой при этом режиме, перемещаются параллельно самим себе;

при установившемся (стационарном) режиме фильтрации, когда гидродинамические характеристики фильтрационного потока практически не меняются со временем; при установившемся движении заданному постоянному значению расхода (или понижения) отвечает стабилизировавшееся понижение (или расход).

**4.24.** Откачки целесообразно проводить по одной из схем:

при изменяющихся во времени динамических уровнях и постоянном дебите $h=f(t)$, $Q=\text{const}$;

при изменяющемся во времени дебите и постоянном динамическом уровне (понижении) $Q=f(t)$, $h=\text{const}$.

Первая схема наиболее приемлема при ведении откачек глубинными насосами; вторая более удобна при откачках штанговыми насосами, «на храп», а также при опробовании самоизливающихся скважин.

**4.25.** Длительность откачки необходимо контролировать по графикам зависимости $S=f(t)$ и $S=f(\lg t)$.

Продолжительность при установившемся режиме определяется установившимся уровнем (или дебитом) при постоянном значении дебита (понижения).

Практически установившимся уровнем при откачке считается такой, который при постоянном дебите скважины изменяется ( с учетом поправок) не более чем на 1—2 см в течение 4—6 ч, причем имеется в виду, что уровень колеблется около какой-то отметки, а не повышается или понижается закономерно или непрерывно.

Практически установившимся дебитом считается такой, значение которого в течение 4—6 ч откачки отклоняется не более чем на 10 % от среднего значения, причем систематического уменьшения или увеличения дебита не наблюдается.

При неустановившемся режиме фильтрации рекомендуется прекращать откачку только после получения четкой выраженной картины временной изменчивости уровней в скважинах (центральной и наблюдательных), характерной для данных гидрогеологических условий.

**4.26.** Если откачка производится из пласта, сложенного супесями или суглинками, то часто невозможно создать достаточные понижения в наблюдательных скважинах (до 30 см). Поэтому в таких гидрогеологических условиях рекомендуется производить непродолжительные откачки (экспресс) из одиночных скважин, а гидрогеологические параметры получать по графикам восстановления уровня.

**4.27.** Необходимым условием для проведения откачки является стабильность естественного режима подземных вод. Поэтому в периоды резких колебаний уровня подземных вод, вызванных снего-

таянием или изменением уровня воды в реке, откачку проводить не следует. Не допускается также проведение откачек из скважин, расположенных вблизи крупных карстовых родников в период резкого колебания их дебитов (ГОСТ 23278—78).

При проведении откачек в условиях нарушенного (нестационарного) режима подземных вод (в условиях работы водозаборов, дренажа или на подтапливаемых территориях) рекомендуется перед откачкой и в период проведения откачки вести наблюдения за характером колебания уровня, который следует учитывать при определении величины понижения в скважинах путем внесения соответствующих поправок.

**4.28.** Откачка должна производиться с максимальным для данного насоса дебитом (или понижением уровня). Во время откачки допускаются отклонения от среднего дебита не более чем на 10 %.

Откачку следует проводить непрерывно, непродолжительные перерывы по техническим причинам не должны превышать суммарно 10—15 % от продолжительности опыта и не должны приводить к искажению графика изменения уровня воды во времени (ГОСТ 23278—78).

При вынужденных остановках испытания целесообразно дожидаться полного восстановления уровня, а затем продолжать откачку заново. По кустовой схеме испытания дебит откачки должен быть таким, чтобы при принятой схеме куста и рекомендуемой продолжительности опыта были обеспечены необходимые величины понижений как в опытной, так и в наиболее удаленных наблюдательных скважинах куста.

В практике ведения полевых работ может возникнуть случай, когда требуемый расход из одной опытной скважины не может быть достигнут. Тогда производится групповая откачка из 2 и более возмущающих скважин. Работа этих скважин должна быть синхронной, дебит для расчетов принимается суммарный.

Величину дебита скважин при откачке можно подобрать в зависимости от диаметров фильтров и типа водоподъемника по табл. 10.

**4.29.** При ведении откачки на 2—3 понижения в рыхлых грунтах для избежания кольматации фильтра откачку следует начинать с минимального понижения, переходя затем к большему. Это облегчает постепенное образование за скважиной естественного фильтра и снижает возможность его кольматации.

При опробовании трещиноватых скальных и полускальных пород откачку целесообразно начинать с максимального понижения и затем переходить к меньшему. При такой последовательности понижений уровня из трещин и пор в начале откачки будет вынесена основная масса мелких частиц шлама, глины, песка и водопроницаемость пород не будет изменяться в ходе откачки. Промежуток

Таблица 10

| Диаметр фильтра, мм | Производительность насосов, м³/ч | | | Производительность эрлифтов, м³/ч | |
|---|---|---|---|---|---|
| | штанговых | | центробежных | параллельное расположение труб | эксцентрическое расположение труб |
| | простого действия | двойного действия | | | |
| 76 | 0,8—1,25 | — | — | — | — |
| 100 | 1,5—3 | — | 25—45 | — | 15—17,5 |
| 168 | 4,5 | 8,75—10 | 65 | 22—25 | 30—35 |
| 219 | 8,5 | 17 | 100 | 40—45 | 45—55 |
| 273 | 17 | 35 | 150 | 85—100 | 125—150 |
| 325 | — | 40 | — | — | 180—360 |

времени между понижениями, необходимый для перестановки насоса, должен быть минимальным.

**4.30.** Организация наблюдений за уровнями воды в скважинах и водоеме и дебитом центральной скважины должна производиться сразу же после запуска насоса. В журнале испытаний должно быть указано точное время начала и окончания испытания — прокачки, откачки, восстановления уровней после прокачки и откачки.

Рекомендуется соблюдать следующий порядок наблюдений: сначала замеряется дебит, затем уровни последовательно в центральной, наблюдательных скважинах, в водоеме.

**4.31.** Частота измерения дебита скважины и динамических уровней воды в процессе откачки должна быть достаточной для последующей обработки материалов (ГОСТ 23278—78). Рекомендуется уровни воды в начале испытания в первые 10—15 мин замерять непрерывно через 1—2 мин, затем в течение 30 мин через 3—10 мин. последующие 2 ч — через 15—20 мин, затем в течение 12 ч — через 30 мин и далее до конца откачки — через 1 ч.

Измерения уровня воды в наблюдательных скважинах куста следует всегда проводить в одной и той же последовательности так, чтобы промежутки времени между замерами в каждой скважине были по возможности одинаковыми.

В скважинах, расположенных за пределами влияния откачки, замеры уровня воды можно производить 2—3 раза в смену.

**4.32.** Измерение расхода откачиваемой воды производится в те же сроки, что и замер уровней воды (ГОСТ 23278—78).

При объемном измерении дебита необходимо, чтобы время наполнения сосуда составляло не менее 30 с. Замеры дебита по возможности следует выполнять трижды, при этом результаты замера не должны отличаться друг от друга более чем на 5 %. В журнал

записывается среднее значение из трех замеров. При измерении дебита водомером, помимо расходов за определенные промежутки времени, фиксируется суммарное количество откачиваемой воды. Целесообразно вести непрерывную запись расходов и уровней воды в скважинах с помощью автоматических приборов — самописцев.

**4.33.** Срок окончания кустовой откачки при установившемся режиме фильтрации определяется условием постоянства во времени разности понижений уровней воды в наблюдательных скважинах, а при откачках из одиночной скважины — практической стабилизацией понижения (дебита).

Срок окончания откачки при неустановившемся режиме определяется получением на графиках временного, площадного и комбинированного прослеживания прямолинейных расчетных участков. Для ориентировочной оценки времени наступления квазистационарного режима для каждой наблюдательной скважины при проектировании откачки можно пользоваться следующей формулой:

$$t_0 \geqslant 2{,}5r^2/a, \qquad (11)$$

при этом радиус зоны квазистационарного режима ориентировочно будет составлять

$$r_{\text{п}} = 0{,}63\sqrt{at}, \qquad (12)$$

где $r$ — расстояние наблюдательной скважины от центральной; $a$ — ориентировочное значение коэффициента уровнепроводности (пьезопроводности) (см. табл. 3).

**4.34.** После окончания откачки проводятся наблюдения за восстановлением уровней воды в центральной скважине и во всех наблюдательных скважинах (в том числе и прифильтровом пьезометре) (ГОСТ 23278—78).

Частота наблюдений должна обеспечивать получение представительных графиков прослеживания. Рекомендуется в первые 10—15 мин уровень измерять через 1—2 мин, затем в течение 30 мин — через 3—5 мин, в течение следующего часа — через 5—10 мин, а затем в течение 6—8 ч — через каждые 30 мин и далее — через 1—2 ч до стабилизации уровня.

Измерения уровня ведут таким образом, чтобы подъем его между очередными замерами не превышал 5 см, и прекращают их при достижении скорости подъема менее 1 см в ч.

**4.35.** В табл. 11 приведены ориентировочные значения водоотдачи и коэффициента фильтрации грунтов (пород).

После наблюдений за восстановлением уровней проводят контрольный замер глубины возмущающей скважины, тщательную проверку оборудования и аппаратуры, повторное нивелирование нулевых точек (при необходимости). Все эти данные записывают в жур-

Таблица 11

| Наименование грунтов | Коэффициент гравитационной водоотдачи, доли единицы | Коэффициент фильтрации $k$, м/сут |
|---|---|---|
| Суглинки | 0,01—0,05 | 0,001—0,5 |
| Супеси | 0,05—0,1 | 0,1—1 |
| Пески: | | |
| пылеватые | 0,05—0,1 | 0,1—1 |
| мелкие | 0,10—0,2 | 1,0—5 |
| средние | 0,15—0,25 | 5—20 |
| крупные, гравелистые | 0,18—0,25 | 20—50 |
| Песчаники: | | |
| на глинистом цементе | 0,02—0,03 | 3—6 |
| на карбонатном цементе | 0,001—0,005 | 3—6 |
| Известняки трещиноватые, закарстованные | 0,008—0,1 | 5—150 |
| Торф: | | |
| неразложившийся | 0,1—0,13 | 1,5—5 |
| слаборазложившийся | 0,07—0,1 | 0,7—1,5 |
| хорошоразложившийся | 0,02—0,04 | 0,08—0,17 |

нал опытной откачки. В случае обнаружения расхождений с данными, принятыми при опыте, в записи вносят соответствующие поправки.

Скважины ликвидируют только после окончания полевой (первичной) обработки результатов испытаний и проверки всех полученных данных.

**4.36.** В целях своевременного контроля откачки и текущей интерпретации ее результатов в процессе опыта (в поле) строятся графики изменения величин дебита и понижений уровней воды во времени в возмущающей скважине $Q=f(t)$, $S=f(t)$, а также графики $S=f(t)$ для наблюдательных скважин. Дополнительно рекомендуется строить при кустовых откачках графики временного $S=f(\lg t)$, площадного $S=f(\lg r)$ и комбинированного $S=f[\lg(t/r^2)]$ прослеживания (ГОСТ 23278—78).

**4.37.** После окончания первичной камеральной обработки результатов испытания все опытные и наблюдательные скважины, исключая оставляемые для стационарных наблюдений за режимом подземных вод, должны быть ликвидированы путем тампонирования, бетонирования или цементации.

Для ликвидации скважины, пройденной в скальных и полускальных породах, применяются бетон или цемент, а в глинистых породах — вязкая глина. Скважины, пробуренные в рыхлых грунтах (песках, галечниках), не тампонируются.

Ликвидационный тампонаж глиной производится забрасыванием шариков или гидравлическим ее выдавливанием. Способ тампонажа забрасыванием глиняных шариков применяется для скважин глубиной до 30 м, пройденных в сухих породах или в породах с безнапорным водоносным горизонтом. Для изготовления шариков применяется тяжелая жирная глина с содержанием песка не более 5—6 %. Шарики скатывают диаметром 8—10 см. Перед спуском шариков в скважину дают им немного подсохнуть и затем забрасывают в скважину из расчета заполнения ее на 0,5—0,7 м по высоте и утрамбовывают ударами желонкой с деревянной пробкой. Качество тампонажа проверяется в процессе его выполнения расчетом коэффициента тампонажа $k_т$, равного отношению объема введенной глины к объему тампонируемого интервала, который должен быть больше единицы.

Способ тампонажа гидравлическим способом более надежен.

При ликвидации бетоном скважина промывается водой через трубу, опущенную на забой.

Для приготовления бетона используется высококачественный портландцемент, который схватывается через 2—3 ч после растворения. Цемент в равных долях с песком и гравием смешивают и разбавляют водой до консистенции жидкого теста. Бетонную смесь заливают в специальную желонку, в нижней части которой имеется стекло, разбиваемое при ударе о забой скважины. После спуска 2—3 желонок бетон уплотняют тяжелой трамбовкой, опускаемой в скважину на тросе.

Ликвидация скважины может быть осуществлена также заливкой качественного цементного раствора через трубку, опускаемую на забой. Проверка качества цементации производится контрольной разбуркой образцов схваченного цемента.

Ликвидация самоизливающихся скважин производится путем накачивания в скважину глинистого или цементного раствора под давлением. После прекращения фонтанирования скважину тампонируют гидравлическим способом или бетоном.

Все данные по ликвидационному тампонажу (цементации) скважины записываются в специальном журнале.

## Первичная камеральная обработка результатов испытания

**4.38.** В процессе откачки для контроля правильности ее проведения и интерпретации результатов строятся индикаторные графики прослеживания изменения уровня во времени и по площади (ГОСТ 23278—78).

4.39. Все построения производятся на листе миллиметровой бумаги, на котором размещаются в определенном порядке колонка скважины, ее конструкция в момент испытания, графики, таблицы результатов испытаний. Допускается графики изменений расхода и понижений во времени строить на миллиметровке в процессе опыта и затем вшивать (вклеивать) в журнал. В целях унификации и сокращения времени графики прослеживания понижения (восстановления) уровня целесообразно строить на стандартных полулогарифмических бланках, где по оси абсцисс откладываются натуральные величины времени. Масштабы графиков выбирают такими, чтобы было обеспечено правильное зрительное восприятие хода испытания.

4.40. При нормальном ходе откачки, отсутствии искажающих факторов и ошибок графики прослеживания $S$—$\lg t$, $S$—$\lg r$, $S$—$\lg t/r^2$ должны иметь плавные очертания и четкие прямолинейные участки. Если же обнаруживаются значительные отклонения отдельных точек, отсутствие прямолинейных участков, то следует выяснить причины этого и при необходимости повторить откачку при соответствующем режиме.

Причинами указанных отклонений точек, кроме ошибок в измерениях, могут быть: засорение фильтра, нестабильность работы насоса или двигателя, неисправности измерительной аппаратуры и пр. Все сомнительные точки должны быть забракованы.

Вместе с тем разброс точек на графиках не всегда свидетельствует о низком качестве опыта, так как он может происходить при наличии очевидных аномальных факторов: фоновых колебаний естественного уровня, плановой неоднородности пласта, промыва трещин, прорыва воды из других горизонтов и пр.

4.41. Результаты первичной обработки данных откачек должны корректировать принятую расчетную схему и методику интерпретации. Итогом первичной камеральной обработки должна быть общая оценка качества результатов откачки.

# 5. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

## Общие положения

5.1. Определение гидрогеологических параметров по результатам откачек воды из скважин нельзя отождествлять с проведением чисто расчетных операций по формулам, описывающим закономерности движения подземных вод к скважинам.

Разнообразие гидрогеологических условий, сложный характер формирования режима подземных вод при откачках, когда одинако-

вые закономерности изменения уровней и расходов могут быть вызваны влиянием самых различных факторов, — все это требует обязательного анализа и интерпретации полученных результатов откачки, основным содержанием которых является доказательство соответствия полученных при испытании закономерностей изменения уровней принятым при обработке математическим зависимостям.

5.2. Современные методы определения гидрогеологических параметров базируются в основном на уравнениях неустановившегося движения. В частных случаях при стационарном, квазистационарном и ложностационарном режимах фильтрации можно определять коэффициенты фильтрации и водопроводимости, а также параметры перетекания и сопротивления русловых отложений по формулам стационарной фильтрации.

5.3. Все методы определения гидрогеологических параметров по результатам откачек воды из скважин могут быть условно разделены на две группы.

Методы первой группы используют данные того периода откачек, при котором на закономерности изменения уровня в процессе испытания не сказывается влияние границ пласта в плане и разрезе. В этом случае закономерности изменения уровней определяются только фильтрационными и емкостными свойствами водовмещающих пород. Методами первой группы определяются коэффициенты фильтрации, водопроводимости и пьезопроводности (или уровнепроводности), водоотдачи.

Методы второй группы основаны на использовании того периода откачек, при котором закономерности изменения уровней подземных вод во времени и в пространстве определяются не только фильтрационными и емкостными свойствами водовмещающих пород, но и граничными условиями пласта в плане и разрезе.

Методами второй группы определяются: коэффициенты фильтрации, водопроводимости, пьезопроводности (или уровнепроводности), водоотдача, коэффициент перетекания, параметры сопротивления ложа водотоков (водоемов).

5.4. При обработке результатов откачек и их дальнейшей интерпретации необходимо учитывать следующие основные факторы, вызывающие изменения напора (уровня) подземных вод:

гидрогеологические условия (литологическое строение водовмещающих грунтов, особенности питания и условия на границах опробуемого пласта);

режим подземных вод (особенности характера колебаний напоров — уровней и влияние на эти колебания различных возмущающих источников, в том числе техногенных);

технологические условия проведения испытания (колебания дебита и напора в процессе откачки вследствие неустойчивости рабо-

ты насосов, возможность их временных остановок, включение новых насосов и т. д.).

Учет указанных факторов позволяет правильно выбрать расчетную схему и провести соответствующую интерпретацию результатов испытаний.

5.5. Основным результатом испытания следует считать установление значений дебита $Q$ и соответствующих ему понижений уровней (напоров) $S$ в центральной и наблюдательных скважинах при установившемся режиме и экспериментальных зависимостей $S$ (при $Q=\text{const}$) или $S/Q$ (при $Q\neq\text{const}$) от времени $t$, $\sqrt{t}$ или $\lg t$ (временное прослеживание), от расстояния $r$ или $\lg r$ (площадное прослеживание), от $\lg(t/r^2)$ (комбинированное прослеживание) при неустановившемся режиме.

5.6. Обработка данных откачек производится для гидродинамических режимов:

Неустановившийся режим

а) Дебит опытной скважины постоянен ($Q=\text{const}$), для пластов ограниченной мощности используется формула Тейса с поправкой Веригина на несовершенство скважины

$$S = (Q/4\pi km)\,[-Ei\,(-U) + \zeta\,(l/m,\ l/r) + \zeta_*] \qquad (13)$$

и для пластов неограниченной мощности

$$S = (Q/4\pi kl)\,[-Ei\,(-U) + \zeta_*], \qquad (14)$$

где $S$ — понижение в скважине напора (уровня); $m$ — мощность пласта, для безнапорного $m=H_e-0{,}5S$ ($H_e$ — естественная глубина пласта); $Ei(-U)$ — экспоненциальная функция (см. табл. 12); $U=r^2/4at$, $r$ — расстояние до наблюдательной скважины, $a$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности); $\zeta$ — дополнительное сопротивление, учитывающее несовершенство скважины по степени вскрытия пласта (определяется по табл. 13), $\zeta_*$ — сопротивление, учитывающее несовершенство опытной скважины (при использовании наблюдательных скважин допускается $\zeta_*$ не учитывать) по характеру вскрытия пласта и характеру движения в трубах ствола скважины (оно обусловлено изменением структуры грунтов в прискважинной зоне вследствие кольматации, в том числе и при бурении, или размывом грунтов в зависимости от технологической схемы проходки выработки, или конструкцией фильтра, отклонением от линейного закона фильтрации в этой зоне и гидравлическими потерями в трубах); суммарная величина $\zeta_c$, называемая скин-эффектом скважины, определяется на основе опытных откачек или по методу аналогии; $l$ — длина рабочей части скважины (фильтра), для незатопленного фильтра $l=l_0-0{,}5S$, $\pi\approx3{,}14$.

б) Дебит опытной скважины изменяется во времени (т. е. $Q\neq\text{const}$), напор (понижение) в опытной скважине постоянен ($S=$

Таблица 12

| $U$ | $-Ei(-U)$ | $U$ | $-Ei(-U)$ | $U$ | $-Ei(-U)$ | $U$ | $-Ei(-U)$ | $U$ | $-Ei(-U)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,001 | 6,332 | 0,11 | 1,737 | 0,39 | 0,719 | 0,67 | 0,396 | 0,95 | 0,239 |
| 0,002 | 5,639 | 0,12 | 1,660 | 0,40 | 0,702 | 0,68 | 0,388 | 0,96 | 0,235 |
| 0,003 | 5,235 | 0,13 | 1,589 | 0,41 | 0,686 | 0,69 | 0,381 | 0,97 | 0,231 |
| 0,004 | 4,948 | 0,14 | 1,524 | 0,42 | 0,670 | 0,70 | 0,374 | 0,98 | 0,227 |
| 0,005 | 4,726 | 0,15 | 1,465 | 0,43 | 0,655 | 0,71 | 0,367 | 0,99 | 0,223 |
| 0,006 | 4,544 | 0,16 | 1,409 | 0,44 | 0,640 | 0,72 | 0,360 | 1,00 | 0,219 |
| 0,007 | 4,392 | 0,17 | 1,358 | 0,45 | 0,625 | 0,73 | 0,353 | 1,1 | 0,186 |
| 0,008 | 4,259 | 0,18 | 1,310 | 0,46 | 0,611 | 0,74 | 0,347 | 1,2 | 0,158 |
| 0,009 | 4,142 | 0,19 | 1,265 | 0,47 | 0,598 | 0,75 | 0,340 | 1,3 | 0,135 |
| 0,01 | 4,038 | 0,20 | 1,223 | 0,48 | 0,585 | 0,76 | 0,334 | 1,4 | 0,116 |
| 0,015 | 3,637 | 0,21 | 1,183 | 0,49 | 0,572 | 0,77 | 0,328 | 1,5 | 0,100 |
| 0,02 | 3,355 | 0,22 | 1,145 | 0,50 | 0,560 | 0,78 | 0,322 | 1,6 | 0,086 |
| 0,025 | 3,137 | 0,23 | 1,110 | 0,51 | 0,548 | 0,79 | 0,316 | 1,7 | 0,075 |
| 0,03 | 2,959 | 0,24 | 1,076 | 0,52 | 0,536 | 0,80 | 0,311 | 1,8 | 0,065 |
| 0,035 | 2,810 | 0,25 | 1,044 | 0,53 | 0,525 | 0,81 | 0,305 | 1,9 | 0,056 |
| 0,04 | 2,681 | 0,26 | 1,014 | 0,54 | 0,514 | 0,82 | 0,300 | 2,0 | 0,049 |
| 0,045 | 2,568 | 0,27 | 0,985 | 0,55 | 0,503 | 0,83 | 0,294 | 2,5 | 0,025 |
| 0,05 | 2,468 | 0,28 | 0,957 | 0,56 | 0,493 | 0,84 | 0,289 | 3,0 | 0,013 |
| 0,055 | 2,378 | 0,29 | 0,931 | 0,57 | 0,483 | 0,85 | 0,284 | 3,5 | 0,007 |
| 0,06 | 2,295 | 0,30 | 0,906 | 0,58 | 0,473 | 0,86 | 0,279 | 4,0 | 0,0038 |
| 0,065 | 2,220 | 0,31 | 0,882 | 0,59 | 0,464 | 0,87 | 0,274 | 4,5 | 0,0021 |
| 0,07 | 2,151 | 0,32 | 0,858 | 0,60 | 0,454 | 0,88 | 0,269 | 5,0 | 0,0011 |
| 0,075 | 2,087 | 0,33 | 0,836 | 0,61 | 0,445 | 0,89 | 0,265 | 5,5 | $6,4\cdot10^{-4}$ |
| 0,08 | 2,027 | 0,34 | 0,815 | 0,62 | 0,437 | 0,90 | 0,260 | 6,0 | $3,6\cdot10^{-4}$ |
| 0,085 | 1,971 | 0,35 | 0,794 | 0,63 | 0,428 | 0,91 | 0,256 | | |
| 0,09 | 1,919 | 0,36 | 0,775 | 0,64 | 0,420 | 0,92 | 0,251 | | |
| 0,095 | 1,870 | 0,37 | 0,755 | 0,65 | 0,412 | 0,93 | 0,247 | | |
| 0,10 | 1,823 | 0,38 | 0,737 | 0,66 | 0,404 | 0,94 | 0,243 | | |

$$-Ei(-U)=\int_U^\infty \frac{e^x}{x}\,dx=\ln\frac{1}{U}-0,577+U-\frac{U^2}{2\cdot 2!}-\frac{U^3}{3\cdot 3!}-\cdots$$

Таблица 13

| $l/m$ | $m/r$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1 | 3 | 10 |
| 0,1 | 0,00391 | 0,122 | 2,04 | 10,4 |
| 0,3 | 0,00297 | 0,0908 | 1,29 | 4,79 |
| 0,5 | 0,00165 | 0,0494 | 0,656 | 2,26 |
| 0,7 | 0,000546 | 0,0167 | 0,237 | 0,879 |
| 0,9 | 0,000048 | 0,0015 | 0,0251 | 0,128 |

| $l/m$ | $m/r$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
| 0,1 | 24,3 | 42,8 | 53,8 | 69,5 | 79,6 | 90,9 |
| 0,3 | 9,2 | 14,5 | 17,7 | 21,8 | 24,9 | 28,2 |
| 0,5 | 4,21 | 6,5 | 7,86 | 9,64 | 11,0 | 12,4 |
| 0,7 | 1,69 | 2,67 | 3,24 | 4,01 | 4,58 | 5,19 |
| 0,9 | 0,3 | 0,528 | 0,664 | 0,846 | 0,983 | 1,12 |

Примечание. Приведенные в таблице значения $\zeta$ используются при расположении рабочей части фильтра у кровли или подошвы пласта. При расположении фильтра внутри пласта значения $\zeta$ должны быть уменьшены при $l/m=0{,}3$ на 1,5 и при $l/m=0{,}5$ на 0,7.

$=S_0=\text{const}$), $Q$ и $S$ для пластов ограниченной мощности определяются по формулам:

$$Q(t) = 4\pi kmS_0/[-Ei(-U_0)] \text{ при } t \geqslant 10r_0^2/a;$$

$$S = S_0[(-Ei(-U)]/[-Ei(-U_0)],\ U_0 = r_0^2/4at, \qquad (15)$$

а для пластов неограниченной мощности

$$Q(t) = 4\pi kl\,S_0/[-Ei(-U_0)]. \qquad (16)$$

в) Дебит опытной совершенной скважины изменяется во времени по заданному закону (скачкообразно, линейно, по параболе, по экспоненте и т. д.) $Q=f(t)$;

$$S = (Q(t)/4\pi km)\,R, \qquad (17)$$

для пластов неограниченной мощности

$$S = (Q(t)/4\pi kl)\,R, \qquad (18)$$

где $Q(t)$ — величина расхода, изменяющаяся во времени, $R$ — сопротивление пласта, зависит от вида закона $Q=f(t)$.

Изменение расхода скачкообразное (см. рис. 21).

$$R_1 = -\sum_{i=1}^{n} \beta_i\, Ei[(-r^2/4a(t-t_{i-1})], \qquad (19)$$

где $\beta_i=(Q_i-Q_{i-1})/Q_T$, $Q_i$ — расход в интервале времени $i$, $n$ — число интервалов изменения расхода, $Q_T$ — максимальная величина расхода за весь период откачки $T$. В (17) принимается $Q(t)=Q_T$.

Изменение расхода линейное $Q_1(t)=Q(t)=\gamma_1 t$; $\gamma_1=Q_T/T$

$$R_2 = -(1+r^2/4at)\,Ei(-r^2/4at) - \exp(-r^2/4at). \qquad (20)$$

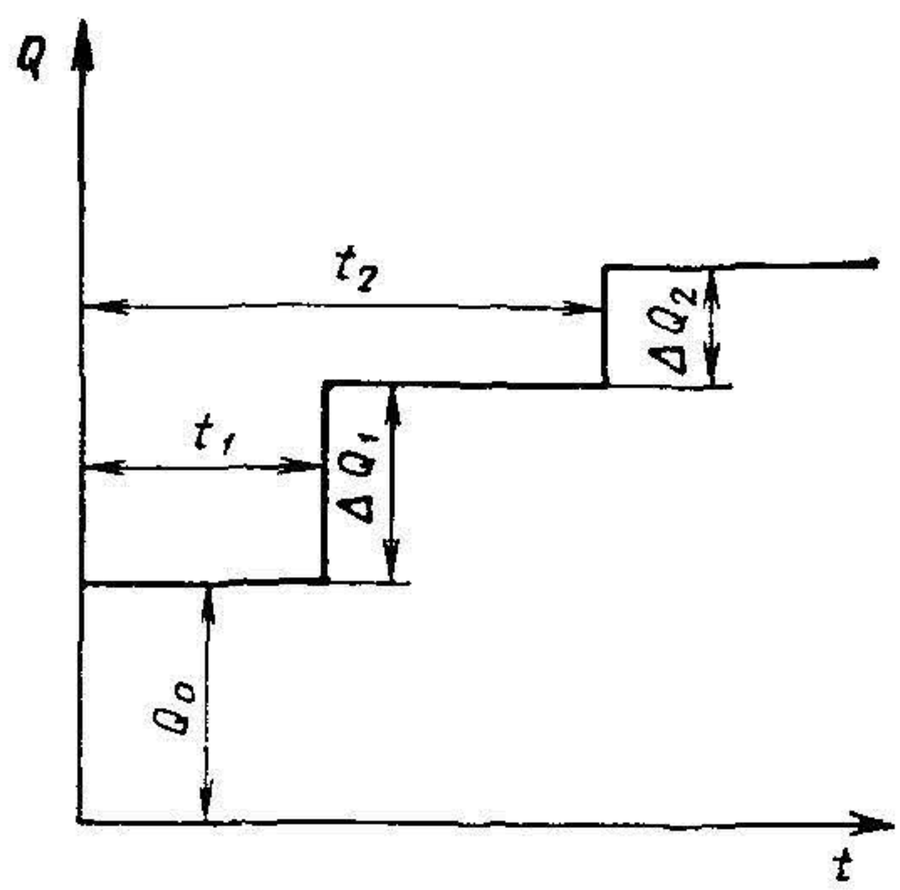



Рис. 21. График ступенчатого (скачкообразного) изменения дебита скважины

Указанное изменение $Q$ возникает при откачках из скважин, пробуренных с глинистой промывкой, в связи с последующим восстановлением фильтрационных свойств призабойной зоны.

Изменение расхода параболическое, $Q(t)=\gamma_2 t^2$, $\gamma_2=Q_T/T^2$ может произойти при выпусках, а также в связи с водопритоком в горной выработке

$$R_3=-[1+2\,r^2/4at+\frac{1}{2}(r^2/4at)^2]\,Ei\,(-r^2/4at)-$$
$$-2\left(1+\frac{1}{4}r^2/4at-\frac{1}{4}\right)\exp(-r^2/4at). \qquad (21)$$

Значения $R_1$, $R_2$ и $R_3$ приведены в табл. 14.

Изменение расхода происходит по экспоненте $Q(t)=Q_T(1-e^{-\gamma_3 t})$ где $\gamma_3$ — коэффициент, определяемый из опытных данных

$$R_4\simeq-(1-\exp(-at/B^2))\,Ei\,(-r^2/4at)-at^2/B^2\exp(-r/4at-$$
$$-at/B^2) \qquad (22)$$

где $B=\sqrt{a/\gamma_3}$.

Зависимость (22) применяется при $r/B\leqslant 0{,}05$ и $r_2/4at\leqslant 0{,}1$. Некоторые значения $R_4$ приведены в табл. 15.

Схема (а) чаще всего принимается для скважин, оборудованных насосами или эрлифтами, которые позволяют проводить простое регулирование дебита. Схема (б) используется, главным образом, для

Таблица 14

| $r^2/4at$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $r^2/4at$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0001 | 8,633 | 7,734 | 7,135 | 0,7 | 0,374 | 0,139 | 0,070 |
| 0,001 | 6,331 | 5,338 | 4,845 | 1 | 0,220 | 0,171 | 0,032 |
| 0,01 | 4,038 | 3,088 | 2,629 | 2 | 0,049 | 0,011 | 0,004 |
| 0,1 | 1,823 | 1,100 | 0,794 | 3 | 0,013 | 0,0024 | 0,0006 |
| 0,2 | 1,223 | 0,649 | 0,426 | 4 | 0,0038 | 0,0006 | 0,0001 |
| 0,3 | 0,906 | 0,437 | 0,268 | 5 | 0,0012 | 0,0002 | 0,0001 |
| 0,5 | 0,560 | 0,233 | 0,128 | | | | |

Таблица 15

| $r^2/4at$ | $r/B$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 |
| 0,0001 | 1,702 | 8,633 | 8,633 | — | — | — | — |
| 0,001 | 0,132 | 5,355 | 6,304 | 6,331 | — | — | — |
| 0,002 | 0,058 | 3,661 | 5,566 | 5,638 | — | — | — |
| 0,0025 | 0,044 | 3,050 | 5,241 | 5,414 | — | — | — |
| 0,005 | 0,018 | 1,549 | 3,806 | 4,721 | — | — | — |
| 0,01 | 0,009 | 0,720 | 2,058 | 4,018 | 5,038 | — | — |
| 0,02 | 0,003 | 0,279 | 1,003 | 3,064 | 3,355 | — | — |
| 0,03 | 0,002 | 0,155 | 0,579 | 2,316 | 2,956 | — | — |
| 0,04 | 0,001 | 0,100 | 0,385 | 1,777 | 2,663 | — | — |
| 0,1 | 0 | 0,017 | 0,073 | 0,435 | 1,241 | 1,813 | — |
| 0,2 | — | 0,001 | 0,009 | 0,070 | 0,394 | 1,130 | — |
| 0,5 | — | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,272 | 0,556 |
| 1 | — | — | — | — | — | 0 | 0,193 |
| 2 | — | — | — | — | — | — | 0,016 |
| 5 | — | — | — | — | — | — | 0 |

опробования фонтанирующих скважин (выпусков), а также при откачке насосами с ограниченной высотой подъема, например штанговыми насосами при работе «на храп» или насосами «поверхностного действия». При схеме (б) наиболее распространены быстрые (мгновенные) изменения дебита скважины, поддерживаемые постоянным после каждого такого изменения.

### Квазистационарный режим

а) Дебит опытной скважины постоянен ($Q$=const), для пластов ограниченной мощности используется формула Тейса-Джекоба с поправкой Веригина на несовершенство скважины по степени вскрытия

$$S = (Q/4\pi km)\left(\ln 2{,}25at/r_0^2 + \zeta_0 + \zeta_*\right). \tag{23}$$

Для пластов неограниченной мощности

$$S = (Q/4\pi kl)\left[\ln\left(2{,}25at/r_0^2\right) + \zeta_*\right]. \tag{24}$$

Время наступления квазистационарного режима $tk$ с ошибкой не более 5 % определяется из условия $r_2/4at_k \leqslant 0{,}1$, т. е. $t_k \geqslant 2{,}5r^2/a$, а радиус зоны его распространения $t_k$ (во времени увеличивается) определяется по зависимости $t_k = 0{,}63\sqrt{at}$.

б) Дебит опытной скважины изменяется во времени, напор (понижение) в опытной скважине постоянен ($S = S_0$=const); для пластов ограниченной мощности определяется по формуле

$$Q(t) = 4\pi kmS_0/\ln\left(2{,}25at/r_0^2\right), \qquad r_0^2/4at \leqslant 0{,}0025, \tag{25}$$

а пластов неограниченной мощности

$$Q(t) = 4\pi kl_0 S_0/\ln\left(2{,}25at/r_0^2\right). \tag{26}$$

Величина понижения в любой точке пласта определяется по формуле

$$S = -[Q(t)/4\pi km]\, Ei(-r^2/4at). \tag{27}$$

Условием применения (25) является $t_0 \geqslant 500r^2/4a$.

в) Дебит опытной совершенной скважины изменяется во времени по заданному закону (скачкообразно, линейно, по параболе и т. д.), т. е. $Q=f(t)$.

Изменение расхода скачкообразно, для каждого интервала времени $t_i - t_{i-1}$ соблюдается условие $r^2/4at \leqslant 0{,}1$

$$S = \frac{Q(t)}{4\pi km}\sum_{i=1}^{n}\beta_i \ln\left[2{,}25a\,(t_i - t_{i-1})/r^2\right]. \tag{28}$$

Изменение расхода линейно $Q(t)=\gamma_1 t$; $\gamma = Q/T$ при относительно длительной откачке $r^2/4at \ll 1$

$$S = [Q(t)/4\pi km]\ln(0{,}83at/r^2). \tag{29}$$

Изменение расхода бараболическое $Q(t)=\gamma_2 t^2$; $\gamma_2 = Q_T/T^2$ при $r^2/4at \ll 1$

$$S = [Q(t)/4\pi km]\ln(0{,}51at/r^2). \tag{30}$$

Установившийся режим

а) Дебит опытной скважины постоянен ($Q=\text{const}$) и соответствующее понижение постоянно ($S_0=\text{const}$), для пластов ограниченной мощности используется формула Дюпюи с поправкой на общее несовершенство скважины $\zeta_c$ (скин-эффект)

$$\zeta_c = \zeta + \zeta_*$$

$$S = (Q/4\pi km)(\ln R/r_0 + 0{,}5\zeta_c), \tag{31}$$

а для пластов неограниченной мощности

$$S = (Q/4\pi kl_0)\left[(1{,}47\ln(l_0/\xi r_0) + 0{,}5\zeta_*\right], \tag{32}$$

где $\xi$ — коэффициент, $\xi=1$ при расположении фильтра у кровли и подошвы пласта и $\xi=2$ при расположении фильтра внутри пласта. $\zeta_*$ — определяется из опыта по аналогии или по данным кустовых откачек.

Стационарный режим откачки возникает только при расположении опытной скважины вблизи границы пласта (водоема, реки и

Таблица 16

| № п. п. | Наименование грунта | $R_п$, м |
|---|---|---|
| 1 | Супеси | 10—20 |
| 2 | Мелкозернистые и пылеватые пески | 20—50 |
| 3 | Разнозернистые и глинистые пески | 50—75 |
| 4 | Неоднородные мелко-, средне-, крупнозернистые пески | 75—100 |
| 5 | Гравийно-галечниковые отложения с примесью мелких частиц, среднезернистые однородные пески | 100—200 |
| 6 | Скальные слаботрещиноватые | 500—200 |

т. д.) и при наличии перетекания в пласт с постоянным напором. Во всех других случаях при обработке результатов опытной скважины используется понятие практически стационарного режима, зона которого весьма приближенно определяется радиусом влияния $R_n = \text{const}$. В действительности $R_n = 1{,}5\sqrt{at}$, т. е. $R_n = f(t)$; он может быть найден на основе обработки данных кустовых откачек по формуле Дюпюи $R_n = (S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1)/(S_1 - S_2)$ или для предварительных (весьма ориентировочных) расчетов по табл. 16.

5.7. Обработку откачек рекомендуется проводить следующими основными методами: произвольных точек, графоаналитическим, эталонной кривой.

## Откачки в однородных пластах

### Пласты не ограниченные в плане

5.8. Метод произвольных точек применяется при кратковременных откачках, в основном по данным наблюдательных скважин. Используются две произвольные точки экспериментальных кривых $S = f(t)$ или $S = f(r)$, отвечающие понижениям:

в наблюдательной скважине $S = S_1$, $S_2$ или в центральной $S = S_{01}$, $S_{02}$ в моменты времени $t = t_1$, $t_2$;

в двух наблюдательных скважинах или в центральной и наблюдательной $S = S_0$, $S_1$ в один и тот же момент времени $t$;

в двух наблюдательных скважинах $S = S_1$, $S_2$ на один и тот же момент времени $t$.

Расчеты целесообразно повторить для других произвольных точек указанных кривых.

При использовании показаний опытной скважины, а также опытной (центральной) и наблюдательной определяется величина только приведенной пьезопроводности (уровнепроводности) $a^*=a\exp(\zeta_0+\zeta_*)$. Дополнительное сопротивление $\zeta_*$ определяется при известных $k$, $a$ и $\zeta_0$ (см. табл. 13) по формуле

$$\zeta_* = (4\pi kmS_0/Q) + Ei(-U) - \zeta_0. \qquad (33)$$

При квазистационарном и установившемся режимах $\zeta_*$ может определяться по формуле

$$\zeta_* = (\zeta_1 - \ln[(r_2/r_0)^{\alpha_1}(r_0/r_1)]^2 - (1-\alpha_1)\zeta_0 - \alpha_1\zeta_2)/(1-\alpha_1) \qquad (34)$$

или

$$\zeta_* = \zeta_1 - \zeta_0 + \alpha_2(\zeta_1 - \zeta_2) + \ln[(r_2/r_1)^{\alpha_2}(r_0/r_1)]^2, \qquad (35)$$

где $\zeta_0$, $\zeta_1$, $\zeta_2$ — дополнительное сопротивление по степени вскрытия соответственно в центральной и в двух наблюдательных скважинах, $r_1$ и $r_2$ — расстояния от центральной до наблюдательных скважин, $\alpha_1=(S_0-S_1)/(S_0-S_2)$, $\alpha_2=(S_0-S_1)/(S_1-S_2)$, $S_0$, $S_1$ и $S_2$ — понижения напора соответственно в центральной и двух наблюдательных скважинах.

Формулы для определения гидрогеологических параметров для пластов ограниченной мощности (коэффициентов фильтрации, пьезопроводности и уровнепроводности) приведены в табл. 17, в которой $r_1$ и $r_2$ — расстояния от оси центральной скважины до первой и второй наблюдательных скважин; $\zeta_0$, $\zeta_1$ и $\zeta_2$ — сопротивления, учитывающие степень вскрытия пласта центральной (опытной) и наблюдательными скважинами, причем для наблюдательных скважин принимается, что $\zeta_*=0$; $U=r^2/4at$.

**5.9. Графоаналитический метод** (метод логарифмической аппроксимации) является одним из основных, так как позволяет одновременно использовать наибольшее число точек графиков $S=f(\lg t)$, $S=f(\lg r)$ и $S=f[(\lg t/r^2)]$ при $Q=\text{const}$; $S/Q=f(\lg t)$, $S/Q=f(\lg r)$ и $S/Q=f(\lg t/r^2)$ при $Q\neq\text{const}$.

Основным условием его применения является $r^2/4at\leqslant 0{,}1$, т. е. относительно длительные откачки. При таких откачках может начать сказываться влияние границ, что следует учитывать при выборе расчетной схемы. Данный способ пригоден для квазистационарного и установившегося режимов фильтрации.

Контрольное время наступления квазистационарного режима $t_к=r^2/0{,}4at$ является аналитическим критерием для нахождения участка графика, отвечающего квазистационарному режиму. Радиус зоны распространения квазистационарного режима $r_k$ определяется зависимостью $r_k=0{,}63\sqrt{at}$.

В качестве основной расчетной зависимости используется для

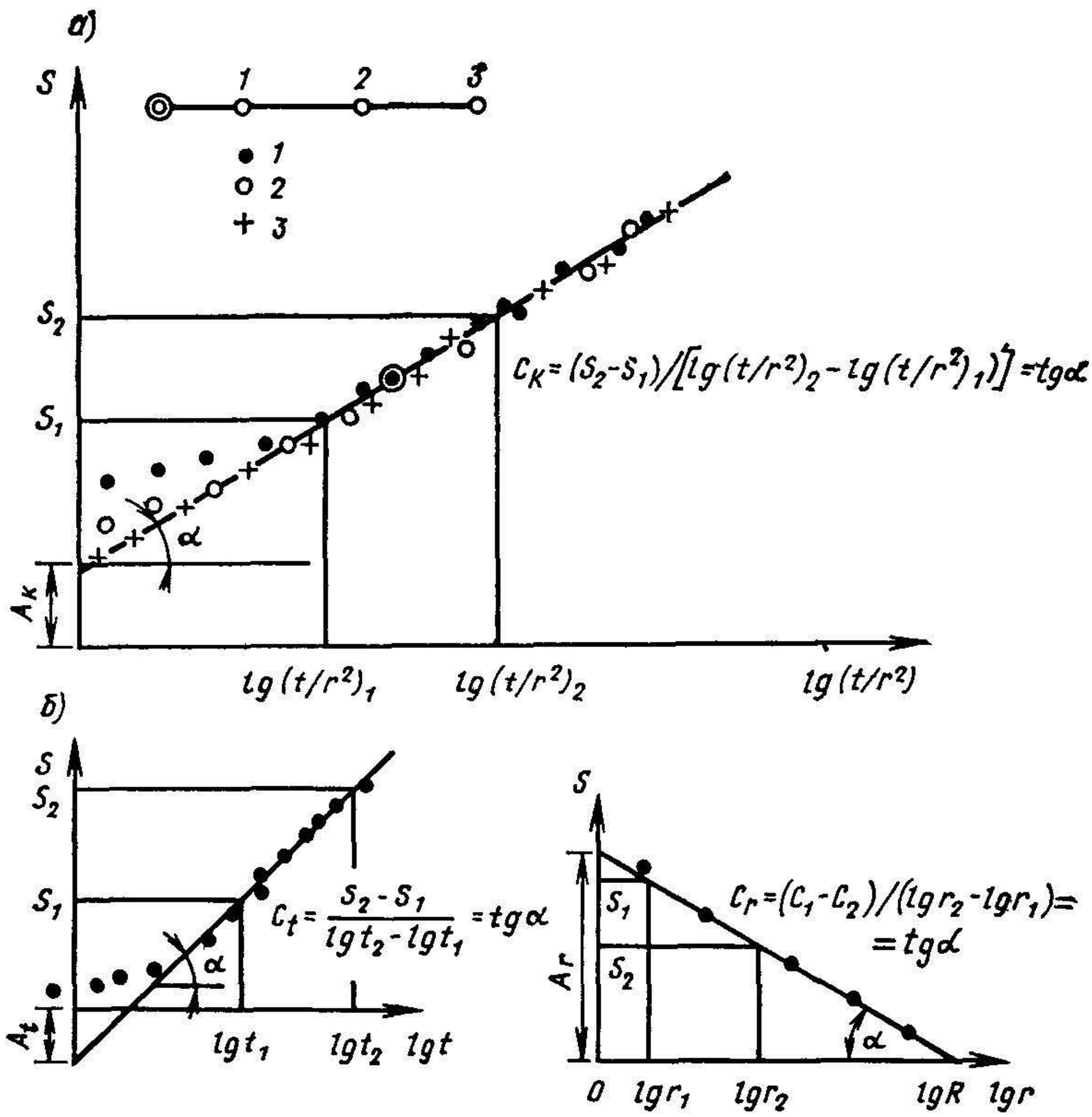



Рис. 22. Графики прослеживания понижения уровня

*а* — комбинированного $S=f(t/r^2)$; *б* — временного $S=f(\lg t)$; *в* — площадного $S=f(\lg r)$

напорного потока формула Тейса, в которой функция $E_i(-U)$ аппроксимируется $\ln(0{,}562/U)$, т. е.

$$S=(Q/4\pi km)\,[\ln(2{,}25at/r^2)+\zeta_c]=(0{,}183Q/km)\,[\lg(2{,}25at/r^2)+ +0{,}434\zeta_c]; \qquad (36)$$

для безнапорного

$$S=[Q/4\pi k\,(H-0{,}5S)]\,(\ln(2{,}25at/r^2)+\zeta_c)= =(0{,}366Q)/k\,(2H-S)\,[\lg(2{,}25at/r^2)+0{,}434\zeta_c]. \qquad (37)$$

Графоаналитический метод основан на представлении уравнения (36) в виде прямой линии $S=A+C\lg\lambda$ (см. рис. 22).

Таблица 17

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | Неустановившийся | Квазистационарный | Установившийся |
| | I. Напорный пласт | | |
| | а) Пласт ограниченной мощности | | |
| | По одной опытной скважине (одиночная откачка) при понижениях $S=S_{01}$, $S_{02}$ для моментов времени $t=t_1$, $t_2$ | | |
| 1 | $k=\frac{Q}{4\pi m S_{01}}[-Ei(-u_{01})+\zeta_0+\zeta_*]$; | $k=\frac{Q}{4\pi m(S_{02}-S_{01})}\ln\frac{t_2}{t_1}$ | $k=\frac{Q}{4\pi mS_0}\left(2\ln\frac{R}{r_0}+\zeta_0+\zeta_*\right)$ или $k=\frac{Q}{4\pi mS_0}\times\left(2\ln\frac{2L}{r_0}+\zeta_0+\zeta_*\right)$ $L$ — расстояние от опытной скважины до внешней границы с постоянным напором |
| 2 | $a=0{,}25r_0^2/u_{01}t_1$, где $u_{01}$ определяется из соотношения $\frac{S_{01}}{S_{02}}=\frac{-Ei(-u_{01})+\zeta_0+\zeta_*}{-Ei(-u_{01}t_1/t_2)+\zeta_0+\zeta_*}$ | $a=a^*\exp[-(\zeta_0+\zeta_*)]$, где $a^*=0{,}445\frac{r_0^2}{t_1}\exp\left(\frac{4\pi kmS_{01}}{Q}\right)$ — | — |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3 | Сопротивление $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек, если $\zeta_*$ неизвестно, то величина $a$ не определяется | Сопротивление $\zeta_*$ при известном $a$ определяется $\zeta_* = \ln(a^*/a) - \zeta_0$ или $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек | Сопротивление $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек; при неизвестном $\zeta_*$ получаются заниженные значения $k$ |
| | По одной наблюдательной скважине при понижениях $S=S_1$, $S_2$ для моментов времени $t=t_1$, $t_2$ | | |
| 4 | $k = \frac{Q}{4\pi m S_1}[-Ei(-u_1) + \zeta_1]$ | $k = \frac{Q}{4\pi m (S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1}$ | |
| 5 | $a = 0{,}25 r_1^2/u_1 t_1$, где $u_1$ определяется из соотношения $\frac{S_1}{S_2} \frac{-Ei(-u_1) + \zeta_1}{-Ei(-u_1 t_1/t_2) + \zeta_1}$ | $a = 0{,}445 \frac{r_1^2}{t_1} \exp\left(\frac{4\pi km S_1}{Q} - \zeta_1\right)$ $\zeta_1$ учитывается для наблюдательной скважины при $r<m$ | — — |
| | По центральной и наблюдательной скважинам на моменты времени $t=t_1$, $t_2$ | | |
| 6 | $k = \frac{Q}{4\pi m (S_0 - S_1)}[-Ei(-u_1) + E(-u_2)] + \zeta_* + \varphi_0 - \zeta_1]$ | $k = \frac{Q}{4\pi m (S_0 - S_1)} \times \left(2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \zeta_0 - \zeta_1 + \zeta_*\right)$ | $k = \frac{Q}{4\pi m (S_0 - S_1)} \times \left(2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \zeta_0 - \zeta_1 + \zeta_*\right)$ |
| 7 | $a = 0{,}25 r_1^2/u_1 t_1$, где $u_1$ определяется из соотношения | $a = 0{,}445 \frac{r_1^2}{t_1} \exp\left(\frac{4\pi km S_1}{Q} - \zeta_1\right)$ — | — — |

*Продолжение табл. 17*

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | Неустановившийся | Квазистационарный | Установившийся |
| 8 | $\frac{S_1}{S_2} = \frac{-Ei(-u_1)+\zeta_1}{-Ei(-u_1 t_1/t_2)+\zeta_1}$<br>Сопротивление $\zeta_*$ при известном $u_1$ определяется<br>$\zeta_* = \frac{\zeta_1 - Ei(u_1) + \alpha Ei(-u_1 r_0^2/r_1^2) - \alpha\zeta_0}{\alpha}$<br>$\alpha = S_1/S_0$ | — | — |
| | | $\zeta_* = \frac{S_0 - S_1}{S_1 - S_1'} \ln\frac{t_1}{t_2} - 2\ln\frac{r_1}{r_2} - \zeta_0 + \zeta_1$<br>где $S_1'$ — понижение в наблюдательной скважине на момент времени $t_2$ | $\zeta_* = \frac{\ln\left[\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{r_0}{R}\right)\right]^2 - (1-\alpha)\zeta_0 - \alpha\zeta_1}{1-\alpha}$,<br>где $\alpha = S_0/(S_0 - S_1)$ |
| | По двум наблюдательным скважинам для момента времени $t_1$ при понижениях в скважинах $S=S_1$, $S_2(S_1>S_2)$ | | |
| 9 | $k = \frac{Q}{4\pi m(S_1 - S_2)}[-Ei(-U_1) + Ei(-(u_2)]$<br>$a = 0{,}25 r_1^2/u_1 t_1$,<br>где $u_1$ определяется из соотношения | $k = \frac{Q}{4\pi m(S_1 - S_2)} \times \left(2\ln\frac{r_2}{r_1} + \zeta_1 - \zeta_2\right)$<br>$a = 0{,}445\frac{r_1^2}{t_1}\exp\left(\frac{4\pi km S_1}{Q} - \zeta_1\right)$ | $k = \frac{Q}{4\pi m(S_1 - S_2)} \times \left(2\ln\frac{r_2}{r_1} + \zeta_1 - \zeta_2\right)$<br>— |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 10 | $\frac{S_2}{S_1}=\frac{-Ei\left(-u_1 r_2^2/r_1^2\right)+\zeta_2}{Ei(-u_1)+\zeta_1}$ | — | — |
| 11 | $\zeta_*=\frac{S_0}{S_1}[-Ei(-u_1)+\zeta_1]+$ $+Ei\left(-u_1 r_0^2/r_1^2\right)-\zeta_0$ при использовании показателей центральной скважины | $\zeta_*=\frac{\zeta_1-\ln\left[\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^{\alpha_1}\times\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2-(1-\alpha_1)\zeta_0-\alpha_1\zeta_2}{1-\alpha}$ при использовании показателей центральной скважины или $\zeta_*=\zeta_1-\zeta_0+\alpha_2(\zeta_1-\zeta_2)+$ $+\ln\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\alpha_2}\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2$, где $\alpha_1=(S_0-S_1)/(S_0-S_2)$, $\alpha_2=(S_0-S_1)/(S_1-S_2)$ | $\zeta_*=\frac{\ln\left[\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{\alpha}\times\left(\frac{r_0}{R}\right)\right]^2-(1-\alpha)\zeta_0-\alpha\zeta_1}{1-\alpha}$, при использовании показателей центральной скважины, где $\alpha=S_0/(S_0-S_1)$ |

б) Пласт неограниченной мощности ($l/m\leqslant 0{,}1$)

| | | | |
|---|---|---|---|
| 12 | По одной опытной скважине (одиночная откачка) при понижениях $S=S_{01}$, $S_{02}$ для моментов времени $t=t_1$, $t_2$ | | |
| | $k=\frac{Q}{4\pi l S_1}[-Ei(-u_{01})+\zeta_*]$ при $0{,}3(l/m)^2>at/m^2$ | $k=\frac{Q}{4\pi l(S_2-S_1)}\ln\frac{t_2}{t_1}$ | $k=\frac{Q}{4\pi l S_0}\left[2\ln\left(1{,}47\frac{l_0}{\xi r_0}\right)+\zeta_*\right]$ При размещении фильтра у кровли и подошвы пласта $\xi=1$, внутри пласта $\xi=2$ Формула применима при $l_0/r_0\geqslant 10$ |

*Продолжение табл. 17*

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | Неустановившийся | Квазистационарный | Установившийся |
| 13 | $a = 0{,}25 r_0^2/u_{01}\ t_1$, где $u_{01}$ определяется из соотношения $\frac{S_{01}}{S_{02}} = \frac{-Ei(-u_{01}) + \zeta_*}{-Ei(-u_{01} t_1/t_2) + \zeta_*}$ | $a = a^* \exp(-\zeta_*)$ $a^* = 0{,}445 \frac{r_0^2}{t_1} \exp \frac{4\pi\, kl\, S_{01}}{Q}$ при $r_0^2/4\, at_1 \geqslant 0{,}15$ и $\ln \frac{2{,}25 at_2}{r_0^2} \leqslant \ln \left(1{,}47 \frac{l_0}{\xi r_0}\right)^2$ — | — — |
| 14 | Сопротивление $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек | Сопротивление $\zeta_*$ при известном $a$ определяется $\zeta_* = \ln(a^*/a)$ или $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек | Сопротивление $\zeta_*$ известно по данным кустовых откачек |
| | По одной наблюдательной скважине при понижениях $S = S_1$, $S_2$ для моментов времени $t = t_1$, $t_2$ | | |
| 15 | $k = -\frac{Q}{4\pi l S_1} Ei(-u_1)$ при $0{,}3(l/m^2) > at/m^2$ | $k = \frac{Q}{4\pi l (S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1}$ при $r_1^2/4\, at_1 \geqslant 0{,}15$ и $\ln \left(\frac{2{,}25 at}{r_1^2}\right) \leqslant$ | $k = \frac{Q}{4\pi l_1 S_1} \left[2N \left(\frac{l_1}{\xi r_1}\right)\right]$, где $N = \operatorname{arsh}\left(2 \frac{l_1}{\xi r_1}\right) -$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 16 | $a = 0{,}25 r_1^2 / u_1\ t_1$, где $u_1$ определяется из соотношения $\frac{S_1}{S_2} = \frac{-Ei(-u_1)}{-Ei(-u_1 t_1/t_2)}$ | $\leqslant \ln\left(1{,}47 \frac{l_1}{\xi r_1}\right)^2$ <br> $a = 0{,}445 \frac{r_0^2}{t_1} \exp\left(\frac{4\pi\, kl\, S_1}{Q}\right)$ <br> — | $-\sqrt{1 + 0{,}25 \frac{\xi r_1}{l_1}} + 0{,}5 \frac{\xi r_1}{l_1}$ <br> — <br> — |
| | По центральной и наблюдательной скважине для моментов времени $t = t_1, t_2$ | | |
| 17 | $k = -\frac{Q}{4\pi l (S_0 - S_1)} [Ei(-u_1) - Ei(-u_2)] - \zeta_*$ | $k = \frac{Q}{4\pi l (S_0 - S_1)} \left(2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \zeta_*\right)$ | $k = \frac{Q}{4\pi l (S_0 - S_1)} \times \left[2 \ln\left(1{,}47 \frac{l}{\xi r_0}\right) - 2N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) + \zeta_*\right]$ при $l/\xi r_0 \geqslant 10$ |
| 18 | $a = 0{,}25 r_1^2 / u_{1,2}\ t_{1,2}$, где $u_1$ определяется из соотношения | $a = 0{,}445 \frac{r_1^2}{t_1} \exp\left(\frac{4\pi\, kl\, S_1}{Q}\right)$ | |

*Продолжение табл. 17*

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | **Неустановившийся** | **Квазистационарный** | **Установившийся** |
| 19 | $\frac{S_1}{S_2} = \frac{-Ei(-u_1)}{-Ei(-u_1 t_1/t_2)}$<br>Сопротивление $\zeta_*$ при известном $u_1$ определяется<br>$\zeta_* = \frac{\zeta_1 - Ei(-u_1) + \alpha Ei \times}{\alpha} \rightarrow$<br>$\rightarrow \frac{\times\left(-ur_0^2/r_1^2\right) - \alpha\zeta_0}{\alpha}$<br>$\alpha = S_1/S_0$ | —<br>$\zeta_* = \frac{S_0 - S_1}{S_1 - S_1'} \ln\frac{t_1}{t_2} - 2\ln\frac{r_1}{r_0}$<br>$S_1'$ — понижение в наблюдательной скважине на момент времени $t_2$ | —<br>При использовании показаний центральной скважины<br>$\zeta_* = (\alpha + 1) N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) -$<br>$- 2\ln\left(1{,}47\frac{l}{\xi r_0}\right),$<br>где $\alpha = (S_0 - S_1)/S_1$ |
| | По двум наблюдательным скважинам для момента времени $t_1$, при понижениях $S=S_1$, $S_2(S_2>S_1)$ | | |
| 20 | $k = -\frac{Q}{4\pi l(S_1 - S_2)}[Ei(-u_1) -$<br>$- Ei(-u_2)]$ | $k = \frac{Q}{4\pi l(S_1 - S_2)}\left(2\ln\frac{r_2}{r_1}\right)$ | $k = \frac{Q}{4\pi l(S_1 - S_2)} \times$ |
| 21 | $a = 0{,}25 r_1^2/u_1 t_1,$<br>где $u_1$ определяется из соотношения<br>$\frac{S_2}{S_1} = \frac{-Ei\left(-u_1 r_2^2/r_1^2\right)}{-Ei(-u_1)}$ | $a = 0{,}445\frac{r_1^2}{t_1}\exp\left(\frac{4\pi kl S_1}{Q}\right)$<br>— | $\times\left[2N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) - N\left(\frac{l}{\xi r_2}\right)\right]$<br>— |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 22 | При использовании показаний центральной скважины $\zeta_* = \frac{S_0}{S_1}\left[-Ei(-u_1)\right] + Ei\left(-u_1 r_0^2/r_1^2\right)$ | При использовании показаний центральной скважины $\zeta_* = \frac{1}{\alpha_1 - 1}\ln\left[\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^{\alpha_1}\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2$ или $\zeta_* = \ln\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\alpha_2}\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2$, где $\alpha_1 = (S_0 - S_1)/(S_0 - S_2)$, $\alpha_2 = (S_0 - S_1)/(S_1 - S_2)$ | При использовании показаний центральной скважины $\zeta_* = (\alpha + 1) N\left(\frac{l}{\xi r_1}\right) - 2\ln\left(1{,}47\frac{l}{\xi r_0}\right)$, где $\alpha = (S_0 - S_1)/S_1$ |

II. Пласт безнапорный

а) Пласт ограниченной мощности

По одной опытной скважине (одиночная откачка) при понижениях $S = S_{01}$, $S_{02}$ для момента времени $t = t_1$, $t_2$

| | | | |
|---|---|---|---|
| 23 | $k = \frac{Q}{4\pi S_{01}(H_e - 0{,}5S_1)} \times \left[-Ei(-u_{01}) + \zeta_0 + \zeta_*\right]$ | $k = \frac{Q}{4\pi(S_{02} - S_{01})} \rightarrow \frac{Q}{[H_e - 0{,}5(S_{01} - S_{02})]}\ln\frac{t_2}{t_1}$ | $k = \frac{Q}{4\pi S_0(H_e - 0{,}5S_1)} \times \left(2\ln\frac{R}{r_0} + \zeta_0 + \zeta_*\right)$ |
| 24 | $a = 0{,}25 r_1^2 / u_{01} t_1$, где $u_{01}$ определяется из соотношения | $a = a^* \exp\left[-(\zeta_0 + \zeta_*)\right]$, $a^* = 0{,}445\frac{r_0^2}{t_1} \times \exp\frac{4\pi k S_{01}(H_e - 0{,}5S_{01})}{Q}$ | — |

*Продолжение табл. 17*

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | Неустановившийся | Квазистационарный | Установившийся |
| 25 | $\frac{S_{01}(H_e-0,5S_{01})}{S_{02}(H_e-0,5S_{02})}=\frac{-Ei(-u_{01})+\zeta_0+\zeta_*}{-Ei(-u_{01}t_1/t_2)+\zeta_0+\zeta_*}$<br>Сопротивление $\zeta_*$ известно | —<br>Сопротивление $\zeta_*$ при известном $a$ определяется $\zeta_*=\ln(a_*/a)-\zeta_0$ | —<br>Сопротивление $\zeta_*$ известно |
| | По одной наблюдательной скважине при понижениях $S=S_1$, $S_2$ для моментов времени $t=t_1$, $t_2$ | | |
| 26 | $k=\frac{Q}{4\pi S_1(H_e-0,5S_1)}\times$<br>$\times[-Ei(-u_1)+\zeta_1]$ | $k=\frac{Q}{4\pi(S_2-S_1)}\times$<br>$\times\frac{Q}{[H_e-0,5(S_1+S_2)]}\ln\frac{t_2}{t_1}$ | — |
| 27 | $a=0,25r_1^2/u_1t_1$<br>где $u_1$ определяется из соотношения<br>$\frac{S_1(H_e-0,5S_1)}{S_2(H_e-0,5S_2)}=\frac{-Ei(-u_1)+\zeta_1}{-Ei(-u_1t_1/t_2)+\zeta_2}$ | $a=0,445\frac{r_1^2}{t_1}\times$<br>$\times\exp\left[\frac{4\pi kS_1(H_e-0,5S_1)}{Q}-\zeta_1\right]$ | — |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | По центральной и наблюдательной скважинам на моменты времени $t=t_1, t_2$ | | |
| 28 | $k=\frac{Q}{4\pi(S_0-S_1)[H_e-0,5\times}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{Q}{\times(S_0+S_1)]}[-Ei(-u_1)+$ $+Ei(-u_2)+\zeta_*+\zeta_0-\zeta_1]$ | $k=\frac{Q}{4\pi(S_0-S_1)\times}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{Q}{\times[H_e-0,5(S_0+S_1)]}\times$ $\times\left[2\ln\frac{r_1}{r_0}+\zeta_0+\zeta_*-\zeta_1\right]$ | $k=\frac{Q}{4\pi(S_0-S_1)[H_e-}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{Q}{-0,5(S_0+S_1)]}\times$ $\times\left[2\ln\frac{r_1}{r_0}+\zeta_0+\zeta_*-\zeta_1\right]$ |
| 29 | $a=0,25r_1^2/u_1t_1$, где $u_1$ определяется из соотношения $\frac{S_1(H_e-0,5S_1)}{S_2(H_e-0,5S_2)}=$ $=\frac{-Ei(-u_2)+\zeta_1}{-Ei(-u_1t_1/t_2)+\zeta_1}$ | $a=0,445\frac{r_1^2}{t_1}\times$ $\times\exp\left[\frac{4\pi kS_1(H_e-0,5S_1)}{Q}-\zeta_1\right]$ | |

*Продолжение табл. 17*

| № п.п. | Режим фильтрации | | |
|---|---|---|---|
| | Неустановившийся | Квазистационарный | Установившийся |
| 30 | Сопротивление $\zeta_*$ при известном $u_1$ определяется $\zeta_* = \frac{\zeta_1 - Ei(-u_1) + \alpha Ei\left(-u_1 r_0^2/r_1^2 - \alpha\zeta_0\right)}{\alpha}$, $\alpha = S_1(H_e - 0{,}5S_1)/S_0(H_e - 0{,}5S_0)$ | $\zeta_* = \frac{S_0(H_e - 0{,}5S_0) - S_1(H_e - 0{,}5S_1)}{S_1'(H_e - 0{,}5S_1')} \ln\frac{t_1}{t_2} - \left(2\ln\frac{r_1}{r_0} - \zeta_0 + \zeta_1\right)$, $S_1'$ — понижение в первой наблюдательной скважине на момент времени $t=t_2$ | $\zeta_* = \frac{\ln\left[\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{r_0}{R}\right)\right] - (1-\alpha)\zeta_0 + \alpha\zeta_1}{1-\alpha}$, $\alpha = \frac{S_0(H_e - 0{,}5S_0) - S_1(H_e - 0{,}5S_1)}{S_1(H_e - 0{,}5S_1)}$ |
| | По двум наблюдательным скважинам для момента времени $t_1$, при | при понижениях $S=S_1$, $S_2(S_1>S_2)$ | |
| 31 | $k = \frac{Q}{4\pi[S_1(H_e - 0{,}5S_1) - S_2(H_e - 0{,}5S_2)]}[-Ei(-u_1) + Ei(-u_2)]$ | $k = \frac{Q}{4\pi[S_1(H_e - 0{,}5S_1) - S_2(H_e - 0{,}5S_2)]} \times \left(2\ln\frac{r_2}{r_1} + \zeta_1 - \zeta_2\right)$ | $k = \frac{Q}{4\pi[S_1(H_e - 0{,}5S_1) - S_2(H_e - 0{,}5S_2)]} \times \left(2\ln\frac{r_2}{r_1} + \zeta_1 - \zeta_2\right)$ |
| 32 | $a = 0{,}25 r_1^2/u_1 t_1$, где $u_1$ определяется из соотношения | $a = 0{,}445\frac{r_1^2}{t} \times \exp\left[\frac{4\pi k S_1(H_e - 0{,}5S_1)}{Q} - \zeta_1\right]$ | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $\frac{S_2(H_e-0,5S_2)}{S_1(H_e-0,5S_1)}=$ $=\frac{-Ei\left(-u_1 r_2^2/r_1^2\right)+\zeta_2}{-Ei(-u_1)+\zeta_1}$ | — | — |
| 33 | При использовании показаний центральной скважины $\zeta_*=\frac{S_0(H_e-0,5S_0)}{S_1(H_e-0,5S_1)}\times$ $\times[-Ei(-u_1)-\zeta_1]+Ei\left(-u_1\times\right.$ $\left.\times r_0^2/r_1^2\right)-\zeta_0$ | При использовании показаний центральной скважины $\zeta_*=\frac{\zeta_1-\ln\left[\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^{\alpha_1}\times\right.}{1-\alpha_1}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{\left.\times\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2-(1-\alpha)\zeta_0-\alpha_1\zeta_0}{1-\alpha_1}$ или $\zeta_*=\zeta_1-\zeta_0+\alpha_2(\zeta_1-\zeta_2)+$ $+\ln\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\alpha_2}\left(\frac{r_0}{r_1}\right)\right]^2,$ где $\alpha_1=\frac{S_0(H_e-0,5S_0)-}{S_0(H_e-0,5S_0)-}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{-S_1(H_e-0,5S_1)}{-S_2(H_e-0,5S_2)};$ $\alpha_2=\frac{S_0(H_e-0,5S_0)-}{S_1(H_e-0,5S_1)-}\rightarrow$ $\rightarrow\frac{-S_1(H_e-0,5S_1)}{-S_2(H_e-0,5S_2)}$ | — |

## Способ временного прослеживания изменения уровня в скважине

Уравнение (36) представляется в виде прямой $S=A_t+C_t \lg t$

$$A_t = (0,183Q/km)\,(\lg(2,25a/r^2) + 0,434\zeta_c) \text{ и } C_t = 0,183Q/km, \quad (38)$$

где $A_t$ — отрезок, отсекаемый на оси ординат прямой графика. $S=f(\lg t)$ при $\lg t=0$, $C_t=\operatorname{tg}\alpha$ — угловой коэффициент этой прямой, определяемый по формуле

$$C_t = (S_2 - S_1)/(\lg t_2 - \lg t_1). \quad (39)$$

Отсюда определяются параметры водопроницаемости

$$k = 0,183Q/C_t m. \quad (40)$$

$$a = 0,445\, r^2/t_0 \exp\left(A_t/C_t' - \zeta_c\right), \quad C_t' = 0,434C_t. \quad (41)$$

Величина $\zeta_c$ будет определяться по данным опытной скважины по формуле

$$\zeta_c = 2,3\left(A_t/C_t - \lg\left(2,25a/r_0^2\right)\right). \quad (42)$$

Для безнапорного пласта строятся графики $S(2H-S)=f(\lg t)$, $S(2H-S)=f(\lg r)$ и $S(2H-S)=f[\lg(t/r^2)]$.

Уравнение (37) представляется в виде $S(2H-S)=A_t+C_t \lg t$.

$$A_t = (0,366Q/k)\,(\lg(2,25a/r^2) + 0,434\zeta_c); \quad C_t = 0,366Q/k;$$

$$C_t = \operatorname{tg}\alpha = [S_2(2H - S_2) - S_1(2H - S_1)]/(\lg t_2 - \lg t_1),$$

$$k = 0,366Q/C_t. \quad (43)$$

Величины $a$ и $\zeta_c$ определяются по (41) и (42).

При одновременном (синхронном) включении группы скважин расчеты ведутся по приведенным выше зависимостям, но вместо $r$ принимается $r=r_{пр}$, где $r_{пр}=(Q_1 \lg r_1+Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n)/Q_n$ и вместо $Q$—$Q_n=\sum_{i=1}^{n} Q_i$ ($Q$ — дебиты отдельных возмущающих скважин).

Случай $Q=f(t)$, уравнение (27) для скачкообразного изменения расхода записывается для напорного пласта (н. п.) в виде

$$S = (0,183Q_n/km)\,(\lg\left(2,25at_{пр}/r_{пр}^2\right) + 0,434\zeta_c) \quad (44)$$

и представляется в виде прямой линии для н. п.; для безнапорного пласта (б. п.)

$$S/Q = A_t + C_t \lg t_{пр}; \quad S(2H - S)/Q_n = A_t + C_t \lg t_{пр};$$

для одиночной многоступенчатой откачки:

$$\lg t_{пр} = (Q \lg t \pm \Delta Q_1 \lg(t - t_2) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg(t - t_n))/Q_n, \quad (45)$$

где $Q_n = Q_1 + \Delta Q_1 + \ldots + \Delta Q_{n-1}$ — дебит последней ступени, $t_2$, $t_3$, $t_n$ — моменты соответствующих изменений дебита скважины $r_{пр} = r_0$;

для групповой откачки с одновременным (синхронным) включением и отключением всех скважин $t_1 = t_2 = t_3, \ldots, t_n$, т. е при $t_{пр} = t$: $(t - t_2)$, ..., $(t - t_n)$ — время действия каждой скважины;

текущее время опыта с начала работы первой скважины, $t_2, \ldots, t_n$ — время подключения скважин; $Q$ — суммарный дебит всех скважин.

Величина $\lg r_{пр}$ для всех перечисленных случаев определяется по зависимости

$$\lg r_{пр} = (Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n)/Q_n,$$

где $Q_n = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_{n-1}$, $r_{пр}$ — приведенное расстояние до наблюдательной скважины.

При откачке, состоящей из нескольких ступеней, строится несколько графиков прослеживания для каждой ступени.

Величина $A_t = (0{,}183Q/km) \lg [(2{,}25a/r_{пр}^2) + 0{,}434\zeta_c]$, $C_t = 0{,}183Q/km$.

Параметры определяются по формулам для н. п.

$$k = 0{,}183Q/C_t m; \qquad a = 0{,}445 r_{пр}^2 \exp\left(A_t/C_t' - \zeta_c\right), \qquad C_t' = 0{,}434C_t;$$

для б. п.

$$k = 0{,}366Q/C_t, \qquad a = 0{,}445 r_{пр}^2 \exp\left(A_t/C_t' - \zeta_c\right). \tag{46}$$

При постоянной величине понижения уровня формула (27) приводится к виду прямой $\frac{S_0}{Q} = A_t + C \lg t$. Параметры определяются по приведенным выше формулам, в которых величина $\zeta_c$ исключается.

Способ площадного прослеживания (при наличии трех и более наблюдательных скважин).

Уравнение (36) представляется в виде прямой для н. п. $S = A_r - C_r \lg r$ (см. рис. 22), где $r$ — расстояние до наблюдательной скважины.

Для н. п.

$$A_r = (0{,}183Q/km)\,(\lg 2{,}25at + 0{,}434\zeta_c), \qquad C_r = 0{,}366Q/km, \tag{47}$$

где $A_r$ — отрезок, отсекаемый на оси ординат прямой графика (при $\lg r = 0$, $C_r$ — угловой коэффициент, определяемый соотношением $C_r = (S_2 - S_1)/(\lg r_2 - \lg r_1)$.

Параметры водопроницаемости определяются по зависимости

$$k = 0{,}366Q/C_r m; \tag{48}$$

$$a = 0{,}445\,(1/t) \exp\left(2A_r/C_r' - \zeta_c\right), \qquad C_r' = 0{,}434C_r; \tag{49}$$

$$\zeta_* = 2{,}3\,(A_r/C_r - \lg 2{,}25at) - \zeta_0. \tag{50}$$

Если продлить прямую $S$—$\lg r$ до пересечения с осью $\lg r$, то определяется точка $\lg r_*$ ($S=0$), тогда вместо (49) имеем

$$a = 0,445 r_*^2 e^{-\zeta_c}/t. \qquad (51)$$

Для безнапорного пласта уравнение (37) представляется в виде $S(2H—S) = A_r — C_r \lg r$ и

$$A_r = (0,366Q/k)\,[\lg(2,25at/r_0^2) + 0,434\zeta_c]; \quad C_r = 0,732Q/k;$$
$$C_r = [S_2(2H - S_2) - S_1(2H - S_1)]/(\lg r_2 - \lg r_1); \quad k = 0,732Q/C_r. \qquad (52)$$

Величины $a$ и $\zeta_*$ определяются по (49)—(51).

При одновременном (синхронном) включении группы скважин расчеты параметров ведутся по приведенным выше зависимостям, но в (36) вместо $r$ принимается $r_{пр}$ и вместо $Q—Q_n = \sum_{i=1}^{n} Q_i$.

Случай $Q=f(t)$, уравнение для скачкообразного изменения дебита представляется: для н. п. $S/Q_n = A_r — C_r \lg \bar{r}_{пр}$ и для б. п. $S(2H—S)/Q = A_r — C_r \lg \bar{r}_{пр}$.

Величины $A_r$ и $C_r$ определяются как и в предыдущем случае, но для одиночной многоступенчатой откачки $t=t_{пр}$ и $S/Q$—$\lg r$. Параметры определяются по (48) — (50).

При параболическом изменении дебита формула (30) также приводится к виду для н. п. $S/Q - \lg r$, для б. н. $S(2H—S) - \lg r$. Параметры определяются как и в предыдущем случае, но величина для н. п.

$$A_r = (0,183Q/km)\,(\lg 0,51at + 0,434\zeta_c).$$

При постоянной величине понижения уравнение (27) приводится к виду: для н. п. $S/Q - \lg r$; для б п $S(2H—S)/Q - \lg r$. Параметры определяются по приведенным выше зависимостям, в которых величина $\zeta_c$ исключается.

При одновременном (синхронном) включении группы скважин (выпусков) расчеты ведутся по тем же зависимостям, но вместо $r$ (27) принимаются $r_{пр} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \lg r_i/Q_n$ и вместо $Q—Q_n = \sum_{i=1}^{n} Q_i$. Асинхронное включение выпусков не рекомендуется.

Способы комбинированного прослеживания заключается в прослеживании уровня во времени одновременно в нескольких наблюдательных скважинах. Уравнение (36) представляется в виде прямой для н. п. $S = A_к + C_к \lg(t/r^2)$ комбинированный график прослеживания)

$$A_к = (0,183Q/km)\,(\lg 2,25a + 0,434\zeta_c), \quad C_к = 0,183Q/km. \qquad (53)$$

Параметры водопроницаемости определяются по зависимостям:

$$k = 0,183Q/C_{\text{к}}m; \tag{54}$$

$$a = 0,445 \exp\left(A_{\text{к}}/C'_{\text{к}} - \zeta_{\text{с}}\right), \quad C'_{\text{к}} = 0,434C_{\text{к}}; \tag{55}$$

$$\zeta_{\text{с}} = 2,3\left(A_{\text{к}}/C_{\text{к}} - \lg\left(2,25\,a/r_0^2\right)\right) - \zeta_0. \tag{56}$$

Для безнапорного пласта уравнение представляется в виде $S(2H-S) = A_k + C_k \lg r$ и

$$A_{\text{к}} = (0,366Q/k)\,(\lg 2,25a + 0,434\zeta_{\text{с}});$$

$$C_k = 0,366Q/k, \qquad C_k = \frac{S_0(2H - S_2) - S_1(2H - S_1)}{\lg\left(\dfrac{t_2}{r_2^2}\right) - \lg\left(\dfrac{t_1}{r_1^2}\right)};$$

$$k = 0,366Q/C_r. \tag{57}$$

Величины $a$ и $\zeta_*$ определяются по (55), (56).

При одновременном (синхронном) включении группы скважин расчеты параметров ведутся по приведенным выше зависимостям, но в (42) вместо $r$ принимается $r_{\text{пр}}$ и вместо $Q - Q_n = \sum_{i=1}^{n} Q_i$.

Случай $Q = f(t)$, уравнение (27) для скачкообразного изменения представляется: для н. п. $S/Q = A_{\text{к}} + C_{\text{к}} \lg(t/r_{\text{пр}}^2)$ и для б. п. $S(2H-S)/Q_n = A_{\text{к}} + C_{\text{к}} \lg(t/r_{\text{пр}}^2)$.

Величины $A_r$ и $C_r$ определяются как и в предыдущем случае. Параметры определяются по (54)—(56). Величина $A_k$ для н. п. при линейном изменении дебита

$$A_{\text{к}} = (0,183Q/km)\,(\lg 0,83a + 0,434\zeta_{\text{с}}). \tag{58}$$

При параболическом изменении дебита формула (30) также приводится к виду: для н. п. $S/Q - \lg(t/r^2)$, а для б. н. $S(2H-S)/Q - \lg(t/r^2)$. Параметры определяются как и в предыдущем случае, но величина $A_k$ для н. п.

$$A_{\text{к}} = (0,183Q/km)\,(\lg 0,51a + 0,434\zeta_{\text{с}}). \tag{59}$$

При постоянной величине понижения уравнение (27) приводится к виду, как в предыдущем случае. Параметры определяются по приведенным выше зависимостям, в которых величина $\zeta_{\text{с}}$ исключается.

При одновременном (синхронном) включении группы скважин (выпусков) расчеты ведутся по тем же зависимостям, но вместо $r$ в (27) принимается $r_{\text{пр}}$ и вместо $Q - Q_n$. Асинхронное включение выпусков не рекомендуется.

**5.10.** На графиках $S - \lg t$ и $S - t/r^2$ выделяются, как правило, три участка. На первом участке точки (малый промежуток времени) не ложатся на прямую, второй участок является рабочим, а

третий — график на нем отклоняется от прямой линии вследствии влияния границ пласта — не используется. На графике $S - \lg r$ возможно отклонение в точках, где еще не возник квазистационарный режим.

Графики площадного режима рекомендуется строить на несколько моментов времени, они должны быть параллельны, что указывает на установление квазистационарного режима.

**5.11.** При инженерных изысканиях весьма часто используются одиночные откачки, в этих случаях необходим, как правило, учет величины $\zeta_*$.

**5.12.** При опробовании слабопроницаемых грунтов в начальный период оказывает влияние емкость самой скважины. Поэтому необходимо использовать данные после истечения определенного времени, которое определяется с точностью до 5 % по зависимости

$$t \geqslant 20\,[S\,(t)\,F_c]/Q, \tag{60}$$

где $Q$ — дебит скважины; $F_c$ — площадь поперечного (живого) сечения скважины; $t$ — время откачки. В противном случае необходим учет влияния емкости скважины).

**5.13.** При использовании методов площадного и комбинированного прослеживания должно выдерживаться условие $r^2_{max} \leqslant 0{,}36at$ ($r_{max}$ — расстояние от центральной до наиболее удаленной наблю- учет влияния емкости скважины.

**5.14.** Метод эталонной кривой. Во многих случаях значение величины $a$ весьма неопределенно и поэтому не представляется возможным выдержать основное условие существования квазистационарного режима, т. е. $r^2/4at \leqslant 0{,}1$.

Рассматриваемый способ исключает это. Он основан на совмещении эталонной кривой $\lg[-Ei(-U)] - \lg(1/U)$ и фактической $\lg S - \lg(t/r^2)$ или $\lg S - \lg t$, добиваясь наилучшего их совпадения при сохранении параллельности осей. При этом происходит сдвижка осей: вертикальных $\lg[-Ei(-U)]$ и $\lg S$ — на величину $\lg(Q/4\pi\,km) = \lg S - \lg[(-Ei(-U)] = \lg S_0$, горизонтальных — на величину $\lg(t/r^2)^*$ [или $\lg t^*$] $= \lg(r_0^2/4a)$ (или $\lg(r^2/4at)$).

Указанное следует из следующего. Логарифмируем (13), принимая $\zeta_c = 0$

$$\lg S = \lg(Q/4\pi km) + \lg[-Ei(-U)], \quad \text{так как } U = r^2/4at,$$

$$\lg\left(t/r^2\right) = \lg\left(r_0^2/4a\right) - \lg(1/U) \text{ или } \lg t^* = \lg\left(r^2/4a\right) - \lg(1/U).$$

Из этих выражений следует, что $\lg S$ и $\lg[-Ei(-U)]$, $\lg(t/r^2)$ (или $\lg t$) и $\lg(1/U)$ как бы смещены относительно друг друга соот-

ветственно на $\lg S^* = Q/4\pi km$ и на $\lg(t/r^2)$ (или $\lg t^*$). Отсюда и определяются параметры

$$k = Q/4\pi mS^*, \tag{61}$$

$$a = 0{,}25\,(r^2/t)^* = r^2/4at^* \text{ или } a = r^2/4t^*. \tag{62}$$

Указанные определения $k$ и $a$ выполняются для наблюдательных скважин. По данным центральной скважины при известных $k$ и $a$ определяется величина $\zeta_*$.

$$\zeta_* = Q/4\pi kmS + Ei\left(-r_0^2/4at\right) - \zeta_0. \tag{63}$$

Недостатком данного метода является существующая неопределенность при производстве совмещений фактических кривых с эталонной — возможны различные варианты совмещения.

## 5.15. Методы прослеживания восстановления после откачек (выпусков)

После проведения любого вида откачки прослеживание восстановления уровня в скважинах является обязательным. Это позволяет проконтролировать определение параметров при откачке, а также служат самостоятельным методом при остановке или изменении режима эксплуатации скважин, или при опробовании слабопроницаемых грунтов, в которых осуществление откачек затруднительно. При прекращении откачки, проводившейся с постоянным или изменяющимся во времени дебитом в хорошо проницаемых грунтах и при дальнейшем продолжительном наблюдении за восстановлением уровня можно пренебречь накоплением воды в стволе скважины. В этом случае используется уравнение неустановившегося режима фильтрации

$$S^* = (Q/4\pi km)\,\{+Ei\,(-r^2/4at) - \alpha Ei\,[-r^2/4a\,(T_0 + t)] + \zeta_c\}, \tag{64}$$

где $\alpha = \dfrac{Q - Q_0}{Q}$, $Q_0$ — измененная величина дебита; при остановке скважины $Q_0 = Q$ и $\alpha = 1$, а $Q = \text{const}$; $\zeta_c$ — принято не зависящим от $t$; $T_0$ — длительность периода откачки до мгновенного изменения дебита до $Q_0$ или до ее остановки; $t$ — время восстановления после $T_0$; $T_0 + t$ — полная продолжительность периода откачки и восстановления на момент времени $t$.

Параметры определяются по методу произвольных точек (при $t > 0{,}1T_0$) для наблюдательных скважин и путем последовательных приближений

$$S_1^*/S_2^* = \{-Ei\,(-U) + \alpha Ei\,[-U/(1 + \bar{T}_0)]\}/\{-Ei\,(-U/\bar{t}_2) + \\ + \alpha Ei\,[-U/\bar{t}_2 + \bar{T}_0)]\}. \tag{65}$$

$$U = r^2/4at; \quad T_0 = T_0/t_1; \quad t_2 = t_2/t_1,$$

$$a = r^2/4Ut, \; k = (Q/4\pi S_1)\{-Ei(-U) + \alpha Ei[-U/1 + T_0)]\} \quad (66)$$

и по данным центральной скважины

$$\zeta_* = \left(4\pi k m S_{01}^*/Q\right) - \left[Ei\left(-r^2/4at_1\right) - \alpha Ei\left(-r^2/4a\left(T_0 + t_1\right)\right)\right] - \zeta_0. \quad (67)$$

При длительных откачках $T_0 \geqslant 10t$, но и $t < r^2/0{,}4a$, первое слагаемое в (64) принимается равным $S_0$ — максимальное понижение напора в конце откачки и вместо (65) получим

$$\left(S_1^* - S_0\right)/\left(S_2^* - S_0\right) = \{-Ei[-U/(1 + \bar{T}_0)]\}/$$
$$/\{-Ei[-U/(\bar{t}_2 + \bar{T}_0)]\}. \quad (68)$$

Для различных случаев при определении параметров можно воспользоваться ранее приведенными зависимостями (см. табл. 17), заменяя в них $S$ на $S^*$ с учетом (65)—(68).

При квазистационарном режиме $t \geqslant t_к = r^2/0{,}4a$ и при $\alpha = 1$ вместо зависимости (64) используется

$$S^* = (0{,}183Q/km)\lg[(T_0 + t)e^{0{,}434\zeta_c}/t]. \quad (69)$$

При наблюдениях восстановления по наблюдательной скважине принимается $\zeta_c = 0$.

Уравнение (69) приводится к виду

для н. п. —

$$S = C\lg[t/(T_0 + t)], \quad C = 0{,}183Q/km, \quad (70)$$

для б. н. —

$$S^* = (2H - S^*) = C\lg[t/(T_0 + t)], \; C = 0{,}366Q/k,$$

и строится график временного прослеживания восстановления в координатах: для н. п. $S - \lg t/T_0 + t$, а для б. п. $S^*(2H - S^*) - \lg(t/T_0 + t)$; угловой коэффициент этого графика $C$ позволяет определить коэффициент фильтрации

для н.п. —

$$k = 0{,}183Q/Cm; \quad (71)$$

для б. п. —

$$k = 0{,}366Q/C.$$

Принимая во внимание, что максимальное понижение уровня к концу периода откачки $T_0$ равно максимальному повышению $S_{max}^* = (Q/4\pi km)\ln(2{,}25aT_0/r^2)$, получаем зависимость для определения параметра

$$a = 0{,}445\,(r^2/T_0)\exp\left(S_{max}^*/C\right), \quad (72)$$

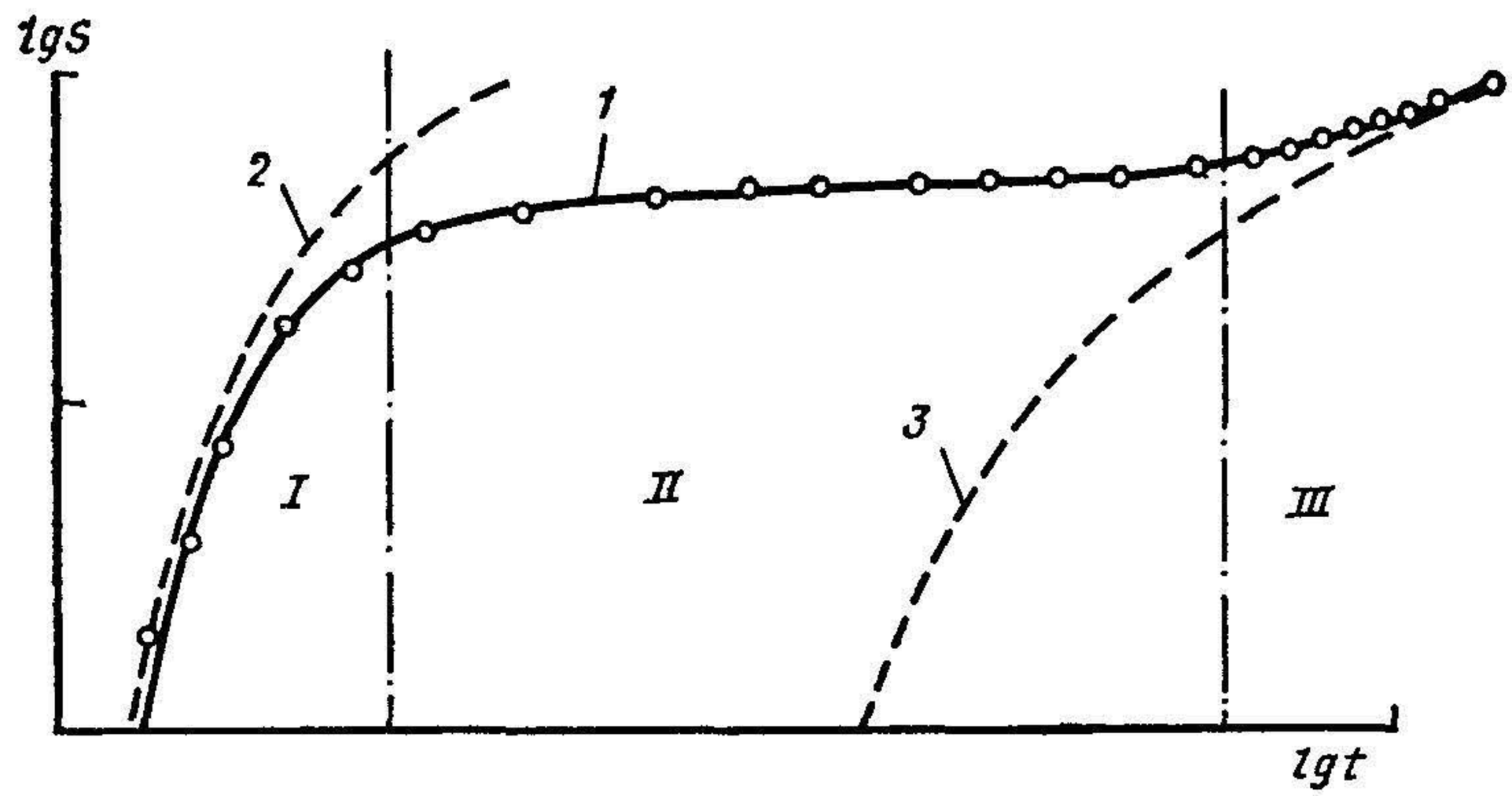



Рис. 23. График зависимости понижения уровня при откачке в безнапорном потоке (в билогарифмическом масштабе)

*I, II, III* — периоды упругогравитационного, ложностационарного и гравитационного режима (границы периодов показаны штрихпунктиром); *1* — кривая понижения уровня в наблюдательной скважине; *2, 3* — кривая функции Тейса для упругого и гравитационного режима

для центральной (одиночной) скважины

$$a = 0,445\left(r_0^2/T_0\right)\exp\left(\left(S^*_{\max}/C\right) - \zeta_c\right). \qquad (73)$$

При условии $T_0 \geqslant 10t$ обработка данных восстановления производится так же, как и для понижения, и используются способы временного, площадного и комбинированного прослеживания.

При $T_0 \leqslant 10$ (медленное восстановление уровня) используется способ временного прослеживания восстановления уровня.

Для слабопроницаемых грунтов (глины, суглинки и т. д.) необходимо учитывать емкость скважин. Это выполняется путем использования поправочного коэффициента $\eta$.

$$S^* = (Q/4\pi km\eta)\lg\left(2,25at/r_0^2\right), \qquad (74)$$

где $\eta = Q/(Q - g(t))$, $g(t) = \pi r_0^2\ (\Delta S_0/\Delta t)$. $\Delta S_0(t)/\Delta t$ — скорость повышения уровня в скважине. При $g(t) > 0$, $\eta > 1$, при $g(t) \to 0$ $\eta \to 1$.

В случаях когда $Qt/F_c S^*(t) \geqslant 20$ или $tkm/F_c \geqslant 20$, влиянием емкости скважины можно с погрешностью не более 5 % пренебречь.

Формула (74) относится и к методам прослеживания, применяемым при обработке данных откачек (вместо $S^*$ принимается $S$).

**5.16.** При проведении относительно длительных откачек в безнапорных пластах на графике $S$—$\lg t$ могут выделяться (в некоторых случаях — при проявлении эффекта Боултона) 3 участка (рис. 23):

первый участок — понижение формируется так же, как в напорном пласте с упругой водоотдачей (упругогравитационный режим);

второй участок (кривая выполаживается) — понижение формируется так же, как и при стационарном режиме откачки (ложностационарный режим);

третий участок — понижение формируется как и при логарифмической аппроксимации формулы Тейса при гравитационной водоотдаче. Таким образом, в безнапорных пластах может происходить как бы запаздывание формирования квазистационарного режима.

Вместе с тем следует учитывать, что первые два участка при производстве откачек в безнапорных пластах формируются не всегда. Это может быть выявлено только после построения графика $S$—$\lg t$.

При обработке данных откачки необходимо выявлять участки, отвечающие квазистационарному режиму.

При отсутствии эффекта Боултона и при величине понижения менее 15—20 % от начальной мощности безнапорного пласта обработка данных откачек производится как и для напорного пласта. При больших понижениях в этом случае обработка так же проводится, как и для напорных пластов, но в расчетах и на графиках вместо $S$ принимается $S(2H—S)$.

При наличии эффекта Боултона при величине понижений более 15—20 % начальной мощности обработка производится также с заменой $S$ на $S(2H—S)$, обработка связана с поиском представительного расчетного участка графика.

Метод временного прослеживания в этом случае следует использовать для обработки данных первого и третьего участков (для определения параметра $a$ — только третьего).

Вместе с тем в результате длительных откачек возможно влияние границ пласта Поэтому здесь рекомендуются способы комбинированного и площадного прослеживания (третий участок графиков). Признаком представительности асимптотических участков на комбинированных графиках является выход графиков по нескольким скважинам на общую асимптоту (касательную). Эта часть графика и является в данном случае расчетной

### Пласты ограниченные в плане

**5.17.** При производстве откачек из скважин, расположенных в относительной близости от границ пласта в начальный период могут быть получены закономерности, свободные от влияния этих границ. В этом случае параметры водопроницаемости определяются так же, как и для пластов не ограниченных в плане.

**5.18.** Так как через некоторый период времени, иногда весьма короткий, на характере понижения уровня начинают сказываться

ближайшие границы пласта, начальные участки временных закономерностей становятся непредставительными. Если работы ведутся вблизи реки, то еще через некоторое время происходит стабилизация снижения уровней и движение принимает установившийся характер.

**5.19.** Для определения параметров на границах пласта задаются условия постоянства во времени напора $H=\text{const}$ (река) или расхода $q=\text{const}$ (например, зона причленения аллювия к коренным породам $q=0$). При этом рассматриваются наиболее часто встречающиеся пласты: полуограниченные и ограниченные (полоса) в плане. В пласте-полосе с двумя границами $q=\text{const}$ установившегося движения не возникает.

При проведении откачки вблизи реки рассматриваются два случая: поверхностные воды (воды реки) имеют хорошую гидравлическую связь с подземными; поверхностные воды (воды реки) не имеют хорошей гидравлической связи с подземными водами (наличие слабопроницаемого заиленного слоя, несовершенства вреза русла реки и неоднородность русловых отложений создают дополнительное фильтрационное сопротивление).

**5.20.** Пласт имеет совершенные границы. Полуограниченный пласт, расчетная зависимость имеет вид

$$S=(Q/4\pi km)\,[-Ei\,(-r^2/4at)\pm Ei\,(-\rho^2/4at)], \qquad (75)$$

где $r$ и $\rho$ — расстояния от рассматриваемой точки, в которой определяется понижение (например, до наблюдательной скважины), до опытной и отраженной (воображаемой) скважины $r=\sqrt{x^2+(y-L)^2}$, $\rho=\sqrt{x^2+(y+L)^2}$ (см. рис. 24). Знак «+» соответствует контуру с постоянным напором, а знак «—» непроницаемому контуру $q=0$. При соблюдении условий $r^2/4at<0{,}1$ и $\rho^2/4at<0{,}1$ вместо формулы (75) получим:

в случае непроницаемого контура $q=0$

$$S=(0{,}183Q/km)\lg(2{,}25at/r\rho); \qquad (76)$$

в случае проницаемости контура (река) $H=\text{const}$

$$S=(0{,}366Q/km)\lg(\rho/r). \qquad (77)$$

Для лучей, направленных перпендикулярно границе пласта $\perp$ и параллельно $\parallel$, расчетные зависимости (76) и (77) имеют соответственно следующий вид:

для случая $q=0$

$$S_{\perp}=(0{,}183Q/km)\lg[2{,}25at/r_1(2L-r_1)]; \qquad (78)$$

$$S_{\parallel}=(0{,}183Q/km)\lg\left(2{,}25at/r_1\sqrt{4L^2+r_1^2}\right); \qquad (79)$$

для случая $H=\text{const}$

$$S_{\perp}=(0{,}366Q/km)\lg[(2L-r_1)/r_1]; \qquad (80)$$

$$S_{\parallel}=(0{,}183Q/km)\lg\left[\left(4L^2+r_1^2\right)/r_1^2\right]. \qquad (81)$$

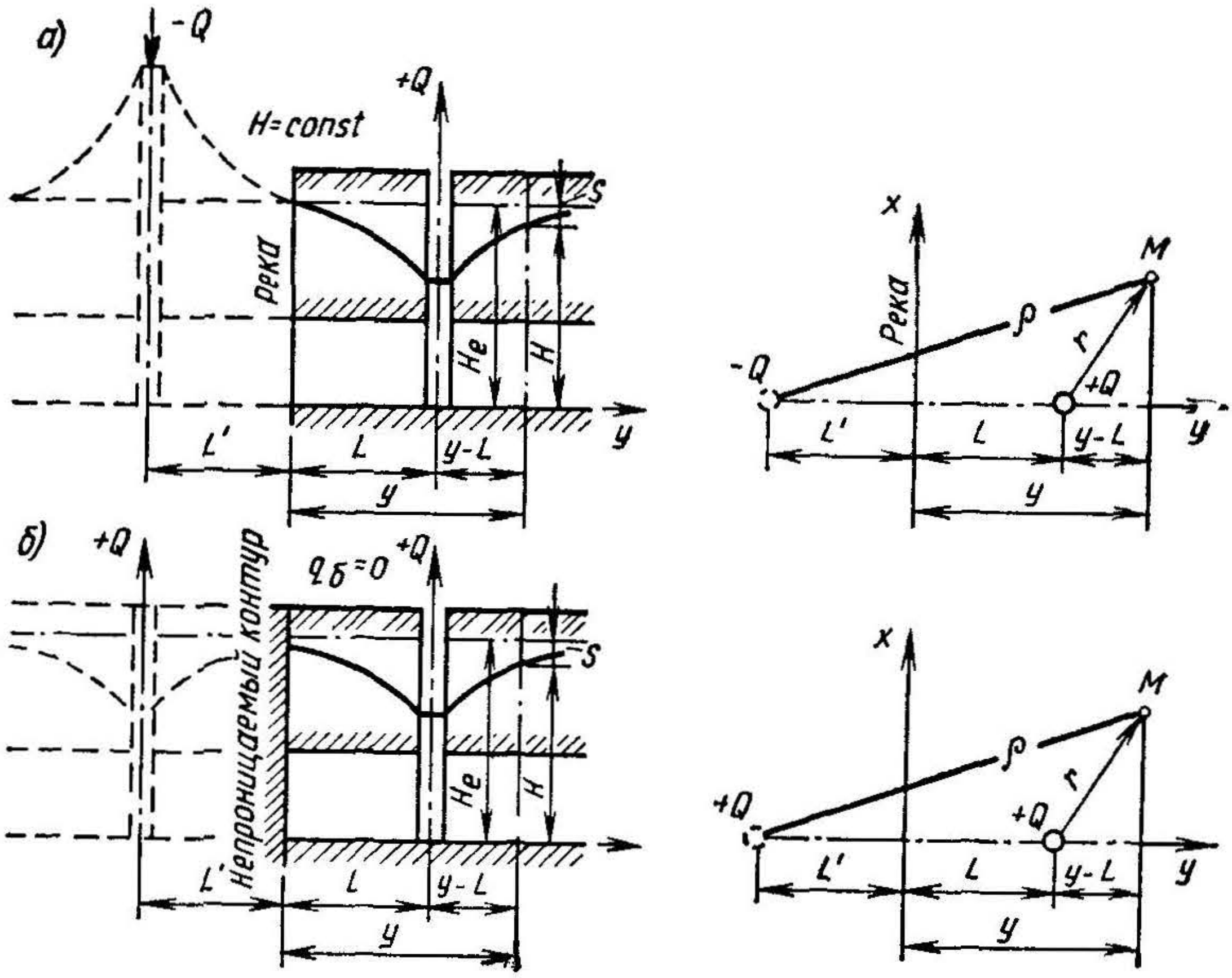



Рис. 24. Схемы к расчету притока подземных вод к скважинам в полуограниченных горизонтах

*а* — с постоянным напором на контуре; *б* — с непроницаемым контуром

Для случая $q=0$ параметры определяются методом временного прослеживания $S=A+C\lg t$;

для лучей, направленных перпендикулярно:

$$A_{\perp}=(0,183Q/km)/\lg[2,25at_0/r_1(2L-r)];\ C_t=(0,183Q/km); \quad (82)$$

$$k=(0,183Q/C_t m);$$

$$a=0,445\,[r_1(2L-r_1)/t_0]\exp(2,3A_{\perp}/C_r);$$

для лучей, направленных параллельно:

$$A_{\parallel}=(0,183Q/km)\lg\left(2,25at_0/r_1\sqrt{4L^2+r_1^2}\right); \quad (83)$$

$$C_t=0,183Q/km;$$

$$k=0,183Q/C_t m; \quad (84)$$

$$a=0,445\left[\left(r_1\sqrt{4L^2-r_1^2}\right)/t_0\right]\exp(2,3A_{\perp}/C_t). \quad (85)$$

Для случая $q=0$ методом площадного прослеживания

$$S=A-C_r\lg(r\alpha),$$

где

$$A_{\perp} = (0,183Q/km)\lg\left(2,25at_1/r_0^2\right);$$
$$\alpha_1 = 2L - r_1;\ C_r = 0,183Q/km;$$
$$A_{\parallel} = (0,183Q/km)\lg\left(2,25at_1/r_0^2\right);$$
$$\alpha_{\parallel} = \sqrt{4L^2 - r_1^2};\ C_r = 0,183Q/km;$$
$$k = 0,183Q/C_r m. \tag{86}$$

Для случая $H$=const параметры определяются методом площадного прослеживания $S = C_r \lg(r\alpha)$;

$$\alpha_{\perp} = 1/2L - r;\ C_r = 0,366Q/km;$$
$$\alpha_{\parallel} = 1/\sqrt{4L^2 + r^2}; \tag{87}$$
$$k = 0,366Q/C_r m.$$

**5.21.** Определение параметров методом произвольных точек производится по следующим формулам.

для случая $q=0$:

а) луч, перпендикулярный границе; по одной наблюдательной скважине на два момента времени $t=t_1$, $t_2$

$$k = [0,183Q/(S_2 - S_1)m]\lg(t_2/t_1); \tag{88}$$
$$a = 0,445\,[r_1(2L \mp r_1)/t_1]\exp(4\pi km/Q); \tag{89}$$

по двум наблюдательным скважинам на момент времени $t_1$

$$k = [0,183Q/(S_1 - S_2)m]\lg[r_2(2L \mp r_2)/r_1(2L \mp r_1)]; \tag{90}$$
$$a = 0,445\left(r_2\sqrt{L^2 + r_2^2}/t_1\right)\exp(4\pi km,Q). \tag{91}$$

Знак «+» в выражении $2L \mp r_1$ принимается при направлении луча в сторону водораздела;

б) луч, направленный к границе; по одной наблюдательной скважине на два момента времени $t=t_1$, $t_2$

$$k = [0,183Q/(S_2 - S_1)m]\lg(t_2/t_1); \tag{92}$$
$$a = 0,445\left[\left(r_1\sqrt{4L^2 + r_1^2}\right)/t_1\right]\exp(4\pi km/Q). \tag{93}$$

по двум наблюдательным скважинам на момент времени $t$

$$k = [0,183Q/(S_1 - S_2)m]\lg\left(r_2\sqrt{4L^2 + r_2^2}/r_1\sqrt{4L^2 + r_1^2}\right); \tag{94}$$
$$a = 0,445\left(r_2\sqrt{4L^2 + r_2^2}/t_1\right)\exp(4\pi km/Q); \tag{95}$$

для случая $H$=const определяется только параметр $k$,

а) луч, перпендикулярный к границе; по одной наблюдательной скважине

$$k = (0,366Q/S_1m)\lg(2L \mp r_1)/r_1], \qquad (96)$$

по двум наблюдательным скважинам

$$k = [0,366Q/(S_1 - S_2)m]\lg[r_2(2L \mp r_1)/r_1(2L - r_2)]; \qquad (97)$$

б) луч, параллельный к границе; по одной наблюдательной скважине

$$k = (0,183Q/S_1m)\lg\left]\left(4L^2 + r_1^2\right)/r_1^2\right]; \qquad (98)$$

по двум наблюдательным скважинам

$$k = [0,183Q/(S_1 - S_2)m]\lg\left[r_2\left(4L^2 + r_1^2\right)/r_1\left(4L^2 + r_2^2\right)\right]. \qquad (99)$$

Для безнапорных пластов определение параметров ведется по тем же зависимостям, только в формулах для одной наблюдательной скважины вместо $Sm$ следует принимать $(2H - S_1)S_1/2$, для двух наблюдательных скважин вместо $(S_1 - S_2)m$ следует — $(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)$.

**5.22.** Пласт, ограниченный двумя параллельными контурами (пласт-полоса), границы пласта совершенны, на обоих контурах $H = \text{const}$ (междуречье).

Расчетная зависимость

$$S = (0,183Q/km)\lg[(\text{ch}(\pi x/L_0) - \cos[\pi(y + L)/L_0])/ \\ /[\text{ch}(\pi x/L_0) - \cos[\pi(y - L)/L_0]]; \qquad (100)$$

для опытной скважины

$$S = (0,366Q/km)\lg[0,64L_0\sin(\pi L/L_0)/r_0]. \qquad (101)$$

На одном контуре $g = 0$, на другом $H = const$

$$S = \frac{0,183Q}{km} \times \\ \times \lg \frac{\left[\text{ch}\frac{\pi x}{2L_0} + \cos\frac{\pi(y + L)}{2L_0}\right]\left[\text{ch}\frac{\pi x}{2L_0} + \cos\frac{\pi(y + L)}{2L_0}\right]}{\left[\text{ch}\frac{\pi x}{2L_0} - \cos\frac{\pi(y + L)}{2L_0}\right]\left[\text{ch}\frac{\pi x}{2L_0} - \cos\frac{\pi(y - L)}{2L_0}\right]}; \qquad (102)$$

для центральной скважины

$$S = \frac{0,366Q}{km}\lg\frac{1,27L_0\,\text{ctg}\frac{\pi L}{L_0}}{r_0}. \qquad (103)$$

На обоих контурах $g=0$

$$S=\frac{0,183Q}{km}\left\{\frac{0,87\pi\sqrt{at}}{L_0}\,i\,\mathrm{erfc}\,(\lambda)+\right.$$

$$\left.+\lg\frac{\cos(2\pi x/L_0)}{\left[\mathrm{ch}\,\frac{\pi r}{L_0}-\cos\frac{\pi(y+L)}{L_0}\right]\left[\mathrm{ch}\,\frac{\pi x}{L_0}-\cos\frac{\pi(y-L)}{L_0}\right]}\right\};\quad(104)$$

для центральной скважины

$$S=(0,366Q/km)\left[1,54\sqrt{at}/L_0+\lg\left(0,16L_0/r_c\sin\frac{\pi L}{L_0}\right)\right],\quad(105)$$

где $L_0$ — ширина полосы, $\mathrm{ierfc}(\lambda)$ — см. табл. 18, $\lambda=x/2\sqrt{at}$.

В последней формуле при $\lambda=0,05$ величина $\mathrm{ierfc}(\lambda)=0,56$, она может быть представлена в виде $S=A_t+C_t\sqrt{t}$,

где

$$A_t=\frac{0,183Q}{km}\times$$

$$\times\lg\frac{\exp(2\pi x/L_0)}{\left[\mathrm{ch}\,\frac{\pi x}{L_0}-\cos\frac{\pi(y+L)}{L_0}\right]\left[\mathrm{ch}\,\frac{\pi x}{L_0}-\cos\frac{\pi(y-L)}{L_0}\right]},\quad(106)$$

$$C_t=0,487Q\sqrt{a}/kmL_0=(S_2-S_1)/\left(\sqrt{t_2}-\sqrt{t_1}\right).\quad(107)$$

Отсюда определяют параметры $k$ и $a$

$$a=2,06\,kmL_0C_t/Q.\quad(108)$$

При известной из графика $S-\sqrt{t}$ начальной координате $A_t$ из выражения (106) определяется коэффициент фильтрации $k$.

Для остальных приведенных выше случаев установившееся движение и параметры определяются методом произвольных точек, заменяя в любой части (100) — (103) $S$ на $k$, а в правой в знаменателе $k$ на $S$. Для безнапорных пластов производится дополнительная замена $S$ на $(2H-S)S/2$.

**5.23. Пласт имеет несовершенные границы, пласт полуограниченный — основной случай.**

Учет дополнительного суммарного сопротивления ложа реки (водоема) в условиях подпертого режима фильтрации производится путем увеличения расстояния от опытной скважины до уреза воды, т. е. вместо $L$ будет $L+\Delta L$, где $\Delta L=\sqrt{kmA_0}\,\mathrm{cth}\,(2b/\sqrt{kmA_0})$, $A_0$ — коэффициент сопротивления заиленного слоя, $A_0=m_0/k_0$ ($m_0$ — мощность этого слоя, $k_0$ — его коэффициент фильтрации); $b$ — половина ширины реки, при выполнении условия $b\geqslant(1,5-2,0)\sqrt{kmA_0}$, (ширина реки $b\geqslant30$ м) ширину реки можно не учитывать, $\Delta L=\sqrt{kmA_0}$. Для более точного определения проводятся кустовые

Таблица 18

| λ | p | λ | p | λ | p |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0,564 | 0,09 | 0,479 | 0,18 | 0,402 |
| 0,01 | 0,554 | 0,10 | 0,470 | 0,19 | 0,394 |
| 0,02 | 0,544 | 0,11 | 0,461 | 0,20 | 0,387 |
| 0,03 | 0,535 | 0,12 | 0,452 | 0,21 | 0,379 |
| 0,04 | 0,525 | 0,13 | 0,444 | 0,22 | 0,371 |
| 0,05 | 0,515 | 0,14 | 0,435 | 0,23 | 0,364 |
| 0,06 | 0,506 | 0,15 | 0,427 | 0,24 | 0,356 |
| 0,07 | 0,497 | 0,16 | 0,419 | 0,25 | 0,349 |
| 0,08 | 0,488 | 0,17 | 0,410 | 0,26 | 0,342 |
| 0,27 | 0,335 | 0,40 | 0,252 | 0,66 | 0,134 |
| 0,28 | 0,328 | 0,42 | 0,241 | 0,68 | 0,127 |
| 0,29 | 0,321 | 0,44 | 0,230 | 0,70 | 0,120 |
| 0,30 | 0,314 | 0,46 | 0,220 | 0,75 | 0,105 |
| 0,31 | 0,308 | 0,48 | 0,209 | 0,80 | 0,091 |
| 0,32 | 0,301 | 0,50 | 0,200 | 0,85 | 0,079 |
| 0,33 | 0,295 | 0,52 | 0,190 | 0,90 | 0,068 |
| 0,34 | 0,288 | 0,54 | 0,181 | 1,0 | 0,050 |
| 0,35 | 0,282 | 0,56 | 0,172 | 1,2 | 0,026 |
| 0,36 | 0,276 | 0,58 | 0,164 | 1,4 | 0,0127 |
| 0,37 | 0,272 | 0,60 | 0,156 | 1,6 | 0,0058 |
| 0,39 | 0,258 | 0,64 | 0,141 | 2,0 | 0,001 |

$\lambda = r^2/4at$

откачки желательно до формирования установившегося режима. Вместо $A_0$ часто используется $B = 1/A_0 km$ ($km$ — водопроводимость водоносного горизонта); $B$ — коэффициент перетекания.

Определение параметров производится по зависимостям, приведенным в п. 5.21, для случая $H = \text{const}$ [9, 34], но в формуле вместо $L$ следует подставлять $(L + \Delta L)$ и вместо $L^2$ соответственно $(L + \Delta L)^2$. Так как $\Delta L$ комплексно учитывает всю сумму факторов, вызывающих дополнительное сопротивление, то $\Delta L$ следует определять на основе опытных откачек.

По данным двух наблюдательных скважин, расположенных на луче параллельно урезу реки, по формуле Дюпюи (99) определяется коэффициент фильтрации; при этом выполняется условие, что расстояние по дальней наблюдательной скважины не превышает 0,7 расстояния от центральной до реки, а до ближайшей наблюдательной скважины не менее 0,7 $m$. Затем по указанным выше зависимостям по створу, перпендикулярному урезу реки, при известном $k$ находится $\Delta L$ и $A_0$. При этом целесообразно наблюдательные скважины располагать на расстоянии $0{,}5L$ и вблизи уреза реки, но не ближе половины мощности пласта.

$$\Delta L = 0{,}5\,[r_1 \exp(2\pi km/Q) - r_1] - L. \qquad (109)$$

Так как исследуемые горизонты, как правило, неоднородны определение $\Delta L$ графоаналитическим методом является предпочтительным. Строится график $S - \lg r$ (используются скважины, расстояния которых до центральной не превышают 0,5 расстояния от центральной до реки). Прямая линия графика отсечет от оси абсцисс $\lg r$ отрезок, равный условному радиусу питания $R$, соответствующему $S=0$. Отсюда имеем $R=2(L+\Delta L)$ и далее

$$\Delta L = 0{,}5R - L. \qquad (110)$$

В речных долинах с большой мощностью водовмещающих отложений и при опробовании отдельного интервала разреза следует определять:

при наличии заиленного слоя параметры $A_0=m_0/k_0$ и $A_z=m_0/k_0+\sum_{i=1}^{n} m_i/k_i$, где $m_i$ и $k_i$ — мощность и вертикальный коэффициент фильтрации $i$-того опробуемого интервала;

при отсутствии заиленного слоя определяется параметр $A_z$.

## Откачки в неоднородных пластах

5.24. Неоднородные пласты делятся на неоднородные в плане и в разрезе.

В плане рассматривается основной случай, когда прямолинейная граница разделяет грунты проницаемые от непроницаемых.

В разрезе рассматриваются следующие случаи:

напорные горизонты, однородные по проницаемости и емкости, разделены слабопроницаемыми (раздельными) слоями, через которые происходит перетекание, причем в одном случае в этих слоях режим фильтрации является жестким, в другом — упругим;

напорный горизонт перекрыт покровными слабопроницаемыми отложениями, в которых сформировались безнапорные воды, т. е. со свободной поверхностью; разделяющий слой отсутствует.

Определение параметров производится для условий установившейся и неустановившейся фильтрации.

5.25. Двухслойный пласт без учета упругих свойств грунтов. Выделяются два случая (рис. 25). В первом случае фильтры центральной и наблюдательной скважин установлены в половине слоя, которая находится у границы между слоями разной проницаемости, а мощность смежного слоя не менее половины мощности слоев, из которого ведется откачка. Длина фильтра центральной и наблюдательной скважин и расстояния от них до первой не должны превышать $^1/_3$ мощности слоя, в котором они установлены [5.27].

Коэффициент фильтрации с использованием показаний двух наблюдательных скважин определяется по формуле

$$k_1 = [Q(A_1 - A_2B)]/[4\pi l(S_1 - S_2B)], \qquad (111)$$

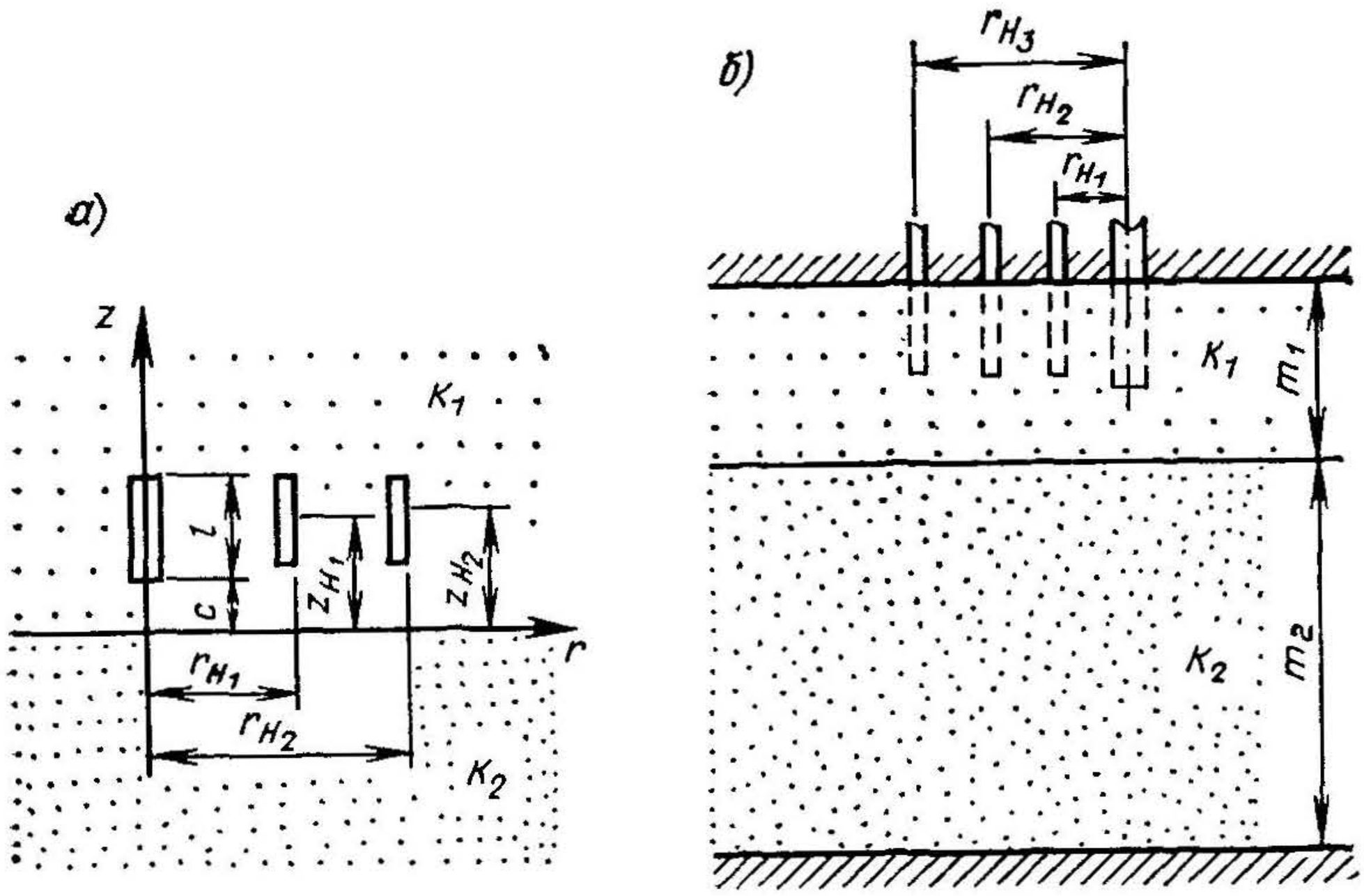



Рис. 25. Схема (разрез) опытного куста скважин в двухслойной толще пород

*а* — с полуограниченными слоями; *б* — с верхним слоем ограниченной мощности и нижним — полуограниченным (фильтры помещены в верхнем слое)

где

$$A_1 = \operatorname{arsh}[(c + l - z_1)/r_1] - \operatorname{arsh}[(c - z_1)/r_1]; \tag{112}$$

$$A_2 = \operatorname{arsh}[(c + l + z_2)/r_2] - \operatorname{arsh}[(c - z_1)/r_2]; \tag{113}$$

$$B = \frac{\operatorname{arsh}\dfrac{c + l + z_1}{r_1} - \operatorname{arsh}\dfrac{c + z_1}{r_1}}{\operatorname{arsh}\dfrac{c + l + z_2}{r_2} - \operatorname{arsh}\dfrac{c + z_2}{r_2}}, \tag{114}$$

где $c$ — расстояние до границы между слоями ближайшего к ней конца фильтра центральной скважины; $z_1$ и $z_2$ — ординаты середин фильтров наблюдательных скважин.

Коэффициент фильтрации смежного слоя определяется по формуле

$$k_2 = k_1 (1 - \alpha_{1,2})/(1 + \alpha_{1,2}), \tag{115}$$

где

$$\alpha_{1,2} = \frac{4\pi k_1 l S_{1,2}/Q - A_{1,2}}{\operatorname{arsh}\dfrac{c + l + z_{1,2}}{r_{1,2}} - \operatorname{arsh}\dfrac{c + z_{1,2}}{r_{1,2}}}. \tag{116}$$

Когда в кровле слоя, из которого ведется откачка, имеется водоупор или свободная поверхность и когда фильтры примыкают к кровле, расчеты ведутся по формулам:

по наблюдательной скважине

$$k = (Q/2\pi l_1 S_1)\,\mathrm{ars}h\,(l/r_1); \qquad (117)$$

по двум наблюдательным скважинам

$$k = (Q/2\pi l\,(S_1 - S_2)]\,[\mathrm{ars}h\,(l/r_1) - \mathrm{ars}h\,(l/r_2)]. \qquad (118)$$

Во втором случае $k_l > k_2$ фильтры скважин установлены в верхнем слое. Выполняются условия $m_2/m_1 \geqslant 2$—3; $r_1(m_1+m_2) \leqslant 0{,}5$. Число наблюдательных скважин не менее 3.

Методом последовательных приближений определяются $\alpha_{1,2}$ из соотношения

$$(S_1 - S_2/S_2 - S_2) = (E_1 - E_2)/(E_2 - E_3); \qquad (119)$$

$$E_1 - E_2 = \mathrm{ars}h\,(l/r_1) - \mathrm{ars}h\,(l/r_2) + N\,(\bar{l},\ \bar{r}_1,\ \alpha_{1,2}) - - N\,(\bar{l},\ \bar{r}_2,\ \alpha_{1,2});$$

$$E_2 - E_3 = \mathrm{ars}h\,(l/r_2) - \mathrm{ars}h\,(l/r_3) + + N\,(\bar{l},\ r_2,\ \alpha_{1,2}) - N\,(\bar{l},\ r_3,\ \alpha_{1,2}),$$

где $\bar{r}_1 = r_1/2m_1$, $\bar{r}_2 = r_2/2m_1$, $\bar{r}_3 = r_3/2m_1$, $\bar{l} = l/2m_1$. Функция $N(\bar{l},\ r,\ \alpha_{1,2})$ определяется по табл. 19.

Определив $\alpha_{1,2}$, $(E_1 - E_2)$ и $(E_2 - E_3)$, находим $k$;

$$k_1 = [Q\,(E_1 - E_2)]/[2\pi l\,(S_1 - S_2) \text{ или}$$

$$k_1 = [Q\,(E_2 - E_3)]/[2\pi l\,(S_2 - S_3)]. \qquad (120)$$

Если $k_1 < k_2$, минимальное количество наблюдательных скважин — 2.

Параметр $\alpha_{1,2}$ определяется методом последовательных приближений по формуле

$$S_2/S_1 = \left[\mathrm{ars}h\,\frac{l}{r_2} + N\,(\bar{l},\ \bar{r}_2,\ \alpha_{1,2})\right] \Big/ \left[\mathrm{ars}h\,\frac{l}{r_1} + N\,(\bar{l},\ \bar{r}_2,\ \alpha_{1,2})\right]. \qquad (121)$$

Коэффициент фильтрации $k_1$ по формуле

$$k_{1,2} = (Q/2\pi l S_1)\,[\mathrm{ars}h\,(l_{1,2}/r_{1,2}) + N\,(\bar{l}_{1,2}\,\bar{r}_{1,2},\ \alpha_{1,2})]. \qquad (122)$$

Таким образом, по двум наблюдательным скважинам находится два значения $k$, которые могут несущественно расходиться между собой. Значение $k_2$ определяется по формуле (115).

**5.26. Двух- и трехслойные пласты, основные случаи.**

В разделяющих слоях жесткий режим фильтрации, т. е. проявлением упругих запасов разделяющего слоя можно пренебречь

Таблица 19

| $\bar{l}$ | $\bar{r}$ | $N(\bar{l}, \bar{r}, \alpha_{12})$ при разных $\alpha_{12}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,6 | —0,6 | 0,8 | —0,8 | 0,9 |
| 0,1 | 0,01 | 0,1837 | —0,09437 | 0,03225 | —0,1180 | 0,4612 |
| | 0,1 | 0,1830 | —0,09382 | 0,3216 | —0,1173 | 0,4602 |
| | 0,5 | 0,1695 | —0,08243 | 0,3027 | —0,1025 | 0,4383 |
| | 1,00 | 0,1433 | —0,06209 | 0,2655 | —0,07616 | 0,3948 |
| | 5,0 | 0,05320 | —0,01495 | 0,1202 | —0,01775 | 0,2100 |
| | 15,0 | 0,01961 | —0,00500 | 0,04979 | —0,005925 | 0,1002 |
| 0,2 | 0,01 | 0,3701 | —0,1911 | 0,6487 | —0,2391 | 0,9267 |
| | 0,1 | 0,3687 | —0,1899 | 0,6468 | —0,2375 | 0,9245 |
| | 0,5 | 0,3404 | —0,1659 | 0,6073 | —0,2063 | 0,8789 |
| | 1,0 | 0,2870 | —0,1243 | 0,5315 | —0,1525 | 0,7902 |
| | 5,0 | 0,1064 | —0,0299 | 0,2403 | —0,0355 | 0,4200 |
| | 15,0 | 0,03921 | —0,01000 | 0,09958 | —0,01185 | 0,2005 |
| 0,3 | 0,01 | 0,5622 | —0,2927 | 0,9829 | —0,3667 | 0,401 |
| | 0,1 | 0,5600 | —0,2907 | 0,9797 | —0,3640 | 1,398 |
| | 0,5 | 0,5141 | —0,2516 | 0,9160 | —0,3130 | 1,324 |
| | 1,0 | 0,4313 | —0,1868 | 0,7985 | —0,2291 | 1,187 |
| | 5,0 | 0,1596 | —0,04482 | 0,3604 | —0,05323 | 0,6300 |
| | 15,0 | 0,05882 | —0,1600 | 0,1494 | —0,01777 | 0,3007 |
| 0,5 | 0,01 | 0,9802 | —0,5258 | 1,698 | —0,6609 | 2,404 |
| | 0,1 | 0,9747 | —0,5208 | 1,690 | —0,6544 | 2,395 |
| | 0,5 | 0,8759 | —0,4341 | 1,554 | —0,5406 | 2,239 |
| | 1,0 | 0,7229 | —0,3127 | 1,337 | —0,3833 | 1,987 |
| | 5,0 | 0,2658 | —0,07463 | 0,6005 | —0,08663 | 1,050 |
| | 15,0 | 0,0982 | —0,2499 | 0,2489 | —0,02962 | 0,5012 |

*Продолжение*

| $\bar{l}$ | $\bar{r}$ | $N(\bar{l}, \bar{r}, \alpha_{12})$ при разных $\alpha_{12}$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | —0,9 | 0,95 | —0,95 | 0,98 | —0,98 | 1,0 | —1,0 |
| 0,1 | 0,01 | —0,1289 | 0,600 | —0,1341 | 0,7738 | —0,1371 | 1,038 | —0,1382 |
| | 0,1 | —0,1281 | 0,5986 | —0,1333 | 0,7726 | —0,1362 | 1,037 | —0,1373 |
| | 0,5 | —0,1116 | 0,5751 | —0,1159 | 0,7482 | —0,1183 | 1,012 | —0,1191 |
| | 1,00 | —0,08241 | 0,5282 | —0,08536 | 0,6990 | —0,08696 | 0,9612 | —0,08722 |
| | 5,0 | —0,01893 | 0,3181 | —0,01948 | 0,4708 | —0,01966 | 0,7189 | —0,01900 |
| | 15,0 | —0,06316 | 0,1740 | —0,00650 | 0,2955 | —0,00647 | 0,5135 | —0,00568 |
| 0,2 | 0,01 | —0,2612 | 1,204 | —0,2718 | 1,552 | —0,2778 | 2,081 | —0,2802 |
| | 0,1 | —0,2595 | 1,202 | —0,2700 | 1,550 | —0,2759 | 2,079 | —0,2783 |
| | 0,5 | —0,2247 | 1,153 | —0,2334 | 1,499 | —0,2383 | 2,026 | —0,2400 |
| | 1,0 | —0,1650 | 1,0570 | —0,1709 | 1,3988 | —0,1741 | 0,1923 | —0,1746 |
| | 5,0 | —0,03786 | 0,6363 | —0,0389 | 0,9416 | —0,3922 | 0,1438 | —0,0380 |
| | 15,0 | —0,01263 | 0,3481 | —0,01298 | 0,5909 | —0,1294 | 0,1027 | —0,01136 |
| 0,3 | 0,01 | —0,4007 | 1,818 | —0,4171 | 2,341 | —0,4264 | 3,135 | —0,4301 |
| | 0,1 | —0,3978 | 1,814 | —0,4140 | 2,337 | —0,4232 | 3,131 | —0,4269 |
| | 0,5 | —0,3409 | 1,736 | —0,3542 | 2,255 | —0,3617 | 3,047 | —0,3642 |
| | 1,0 | —0,2478 | 1,587 | —0,2567 | 2,100 | —0,2615 | 2,887 | —0,2623 |
| | 5,0 | —0,05677 | 0,9544 | —0,0584 | 1,412 | —0,05896 | 2,157 | —0,05698 |
| | 15,0 | —0,01894 | 0,5221 | —0,01948 | 0,8864 | —0,01941 | 1,540 | —0,01704 |
| 0,5 | 0,01 | —0,7734 | 3,103 | —0,7536 | 3,978 | —0,7707 | 5,303 | —0,7781 |
| | 0,1 | —0,7161 | 3,094 | —0,7459 | 3,968 | —0,7628 | 5,293 | —0,7700 |
| | 0,5 | —0,5892 | 2,927 | —0,6124 | 3,795 | —0,6254 | 5,115 | —0,6300 |
| | 1,0 | —0,4146 | 2,655 | —0,4294 | 3,510 | —0,4374 | 4,822 | —0,4386 |
| | 5,0 | —0,09452 | 1,591 | —0,09722 | 2,354 | —0,09816 | 3,595 | —0,08486 |
| | 15,0 | —0,03157 | 0,8702 | —0,03244 | 2,477 | —0,03234 | 2,507 | —0,02841 |

Таблица 20

| $U$ | $\bar{r}$ | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 |
| 0, | 4,854 | 3,505 | 2,745 | 2,229 | 1,849 | 1,555 | 1,321 | 1,131 | 0,974 | 0,842 | 0,428 | 0,228 | 0,0695 |
| 0,001 | 4,829 | 3,505 | | | | | | | | | | | |
| 0,005 | 4,296 | 3,457 | 2,743 | 2,229 | | | | | | | | | |
| 0,01 | 3,815 | 3,288 | 2,710 | 2,225 | 1,849 | 1,555 | 1,321 | 1,131 | | | | | |
| 0,02 | 3,244 | 2,952 | 2,569 | 2,181 | 1,838 | 1,553 | 1,321 | 1,131 | 0,974 | | | | |
| 0,03 | 2,887 | 2,690 | 2,411 | 2,103 | 1,806 | 1,542 | 1,318 | 1,130 | 0,973 | 0,842 | | | |
| 0,04 | 2,629 | 2,482 | 2,266 | 2,016 | 1,760 | 1,521 | 1,309 | 1,127 | 0,972 | 0,842 | | | |
| 0,05 | 2,427 | 2,311 | 2,137 | 1,928 | 1,708 | 1,493 | 1,296 | 1,121 | 0,790 | 0,841 | | | |
| 0,06 | 2,262 | 2,167 | 2,023 | 1,845 | 1,652 | 1,459 | 1,277 | 1,112 | 0,966 | 0,836 | | | |
| 0,07 | 2,123 | 2,044 | 1,921 | 1,767 | 1,597 | 1,423 | 1,255 | 1,099 | 0,959 | 0,834 | 0,428 | | |
| 0,08 | 2,003 | 1,935 | 1,829 | 1,695 | 1,544 | 1,386 | 1,231 | 1,085 | 0,951 | 0,832 | 0,428 | | |
| 0,09 | 1,898 | 1,839 | 1,746 | 1,627 | 1,492 | 1,349 | 1,205 | 1,068 | 0,941 | 0,826 | 0,427 | | |
| 0,1 | 1,805 | 1,753 | 1,670 | 1,564 | 1,442 | 1,312 | 1,179 | 1,051 | 0,930 | 0,819 | 0,427 | 0,228 | |
| 0,2 | 1,216 | 1,194 | 1,600 | 1,115 | 1,059 | 0,996 | 0,928 | 0,858 | 0,786 | 0,715 | 0,414 | 0,227 | 0,0695 |
| 0,3 | 0,902 | 0,890 | 0,871 | 0,846 | 0,814 | 0,778 | 0,737 | 0,693 | 0,648 | 0,601 | 0,281 | 0,221 | 0,0684 |
| 0,4 | 0,700 | 0,693 | 0,681 | 0,665 | 0,645 | 0,621 | 0,594 | 0,565 | 0,535 | 0,502 | 0,341 | 0,210 | 0,0691 |
| 0,5 | 0,558 | 0,553 | 0,545 | 0,534 | 0,521 | 0,504 | 0,486 | 0,466 | 0,444 | 0,421 | 0,301 | 0,194 | 0,0681 |
| 0,6 | 0,453 | 0,450 | 0,444 | 0,436 | 0,427 | 0,415 | 0,402 | 0,387 | 0,371 | 0,354 | 0,263 | 0,177 | 0,0664 |
| 0,7 | 0,373 | 0,370 | 0,366 | 0,361 | 0,353 | 0,345 | 0,335 | 0,324 | 0,312 | 0,300 | 0,229 | 0,160 | 0,0639 |
| 0,8 | 0,310 | 0,308 | 0,305 | 0,301 | 0,295 | 0,289 | 0,282 | 0,273 | 0,264 | 0,254 | 0,199 | 0,144 | 0,0607 |
| 0,9 | 0,260 | 0,258 | 0,256 | 0,253 | 0,249 | 0,244 | 0,238 | 0,231 | 0,224 | 0,217 | 0,173 | 0,128 | 0,0572 |
| 1,0 | 0,219 | 0,218 | 0,216 | 0,214 | 0,210 | 0,207 | 0,202 | 0,197 | 0,191 | 0,186 | 0,151 | 0,114 | 0,0534 |
| 2,0 | 0,0488 | 0,0487 | 0,0485 | 0,0482 | 0,0477 | 0,0473 | 0,0460 | 0,0452 | 0,0444 | 0,0394 | 0,0335 | 0,0210 | |
| 3,0 | 0,0130 | 0,0130 | 0,0130 | 0,0129 | 0,0128 | 0,0126 | 0,0125 | 0,0123 | 0,0112 | 0,0112 | 0,0100 | 0,0071 | |

$$W_n(U, \bar{r}) = \int_U^\infty \exp(-x - \bar{r}^2/4x)\, dx/x; \quad W_n(U, 0) = W(U); \quad W_n(0, \bar{r}) = 2K_0(\bar{r})$$

и поступление воды в опробуемый пласт обусловлено лишь перетеканием из соседних водоносных пластов через несжимаемый слой.

В разделяющих слоях упругий режим фильтрации, т. е. упругие запасы разделяющего слоя учитываются, и поступление воды в опробуемый пласт осуществляется за счет упругоемкости раздельных слабопроницаемых слоев и перетеканием через них из соседних пластов.

Разделяющий слой отсутствует, опробуемый напорный пласт, перекрыт слабопроницаемыми водоносным безнапорным горизонтом (покровные отложения).

5.27. Определение параметров при жестком режиме фильтрации в разделяющем слое.

1. Напор в горизонтах, из которых происходит переток, постоянен.

Основная расчетная зависимость имеет вид

$$S = (Q/4\pi km)\, W_{\text{п}}(U,\ \bar{r}), \qquad (123)$$

где $U=r^2/4at$, $\bar{r}=r/B$, $B$ — параметр перетекания, $B=\sqrt{kmm_0/k_0}$ — при наличии одного слабопроницаемого раздельного слоя и $B=\sqrt{kmm_0m_{00}/(km_{00}-k_{00}m_0)}$ при двух слоях $W_{\text{п}}(U,\ r)$ — табл. 20), $W_{\text{п}}(0;\ \bar{r})=2K_0(\bar{r})$, $K_0(x)$ — функция Бесселя нулевого порядка второго рода от мнимого аргумента (табл. 21) при $t>(2{,}5—5{,}0)\ B^2/a$, $W_{\text{п}}(U,\ \bar{r})\approx 2K_0(\bar{r})$ (при $\bar{r}<1{,}0$), $W_{\text{п}}(U,\ 0)=E_i(-U)$; $k$, $k_0$, $k_{00}$ и $m$, $m_0$, $m_{00}$ соответственно — коэффициенты фильтрации и мощности опробуемого пласта и раздельных слоев.

На графике $S=f(lgt)$ обычно выделяются участки: прямолинейный участок (до точки перегиба) — идет главным образом сра-

Таблица 21

| $x$ | $e^x$ | $K_0(x)$ | $e^x K_0(x)$ | $x$ | $e^x$ | $K_0(x)$ | $e^x K_0(x)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,01 | 1,010 | 4,721 | 4,768 | 0,60 | 1,822 | 0,777 | 1,416 |
| 0,02 | 1,020 | 4,028 | 4,109 | 0,70 | 2,013 | 0,660 | 1,330 |
| 0,03 | 1,030 | 3,623 | 3,733 | 0,80 | 2,225 | 0,565 | 1,258 |
| 0,04 | 1,040 | 3,336 | 3,472 | 0,90 | 2,459 | 0,486 | 1,197 |
| 0,05 | 1,051 | 3,114 | 3,273 | 1,00 | 2,718 | 0,421 | 1,144 |
| 0,06 | 1,061 | 2,932 | 3,114 | 1,20 | 3,320 | 0,318 | 1,057 |
| 0,07 | 1,072 | 2,779 | 2,981 | 1,4 | 4,055 | 0,243 | 0,988 |
| 0,08 | 1,083 | 2,647 | 2,868 | 1,6 | 4,953 | 0,188 | 0,930 |
| 0,09 | 1,094 | 2,531 | 2,769 | 1,8 | 6,049 | 0,145 | 0,882 |
| 0,10 | 1,105 | 2,427 | 2,282 | 2,0 | 7,389 | 0,113 | 0,841 |
| 0,20 | 1,221 | 1,752 | 2,140 | 3,0 | 20,085 | 0,034 | 0,697 |
| 0,30 | 1,349 | 1,372 | 1,852 | 4,0 | 54,598 | 0,011 | 0,609 |
| 0,40 | 1,491 | 1,114 | 1,662 | 5,0 | 148,413 | 0,0037 | 0,547 |
| 0,50 | 1,643 | 0,924 | 1,524 | | | | |

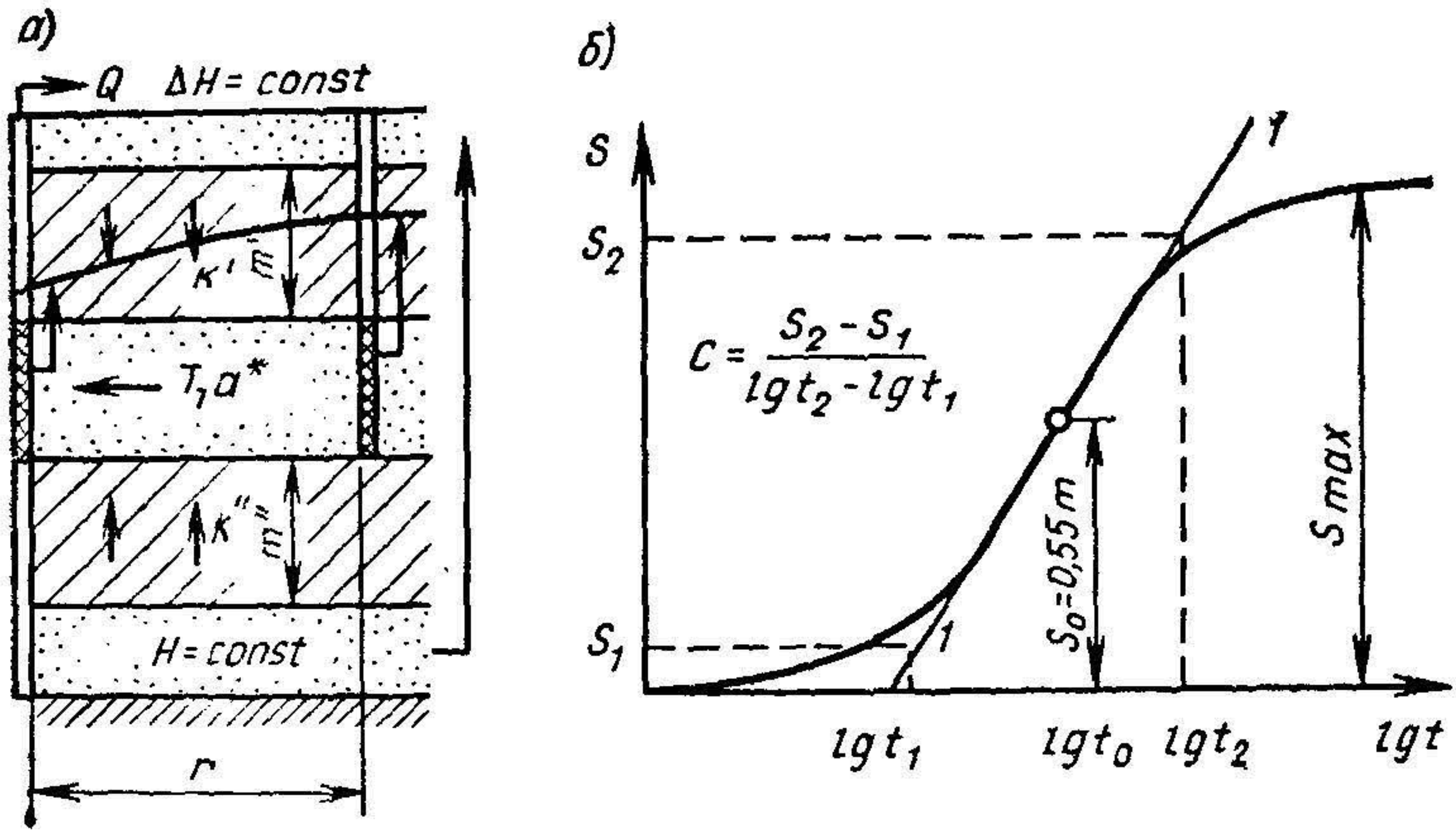



Рис. 26. Откачка при перетекании из водоносных горизонтов с постоянным напором

*а* — фильтрационная схема; *б* — полулогарифмический график прослеживания

ботка упругих запасов опробуемого пласта (на этом раннем этапе откачки определение параметров этого пласта производится как и для напорного изолированного пласта, перетекание здесь еще не сказывается) и ложностационарный режим фильтрации, график $S=f(lgt)$ горизонтальная линия, весь расход откачки обеспечивается перетеканием.

Для первого участка график $S=f(lgt)$ может иметь плавные криволинейные очертания, тогда используется основная зависимость (123).

Для второго участка (при его существовании) используется формула Тейса, в которой $W_п(U, \bar{r})=2K_0(\bar{r})$.

Максимальное понижение в момент наступления стационарного режима (рис. 26) определится соотношением

$$S_{max}=(Q/2\pi km)\,K_0(\bar{r}), \qquad (124)$$

а при $r=r/B<0{,}2$—$0{,}3$ имеем

$$S_{max}=(Q/4\pi km)\ln(1{,}12B/r). \qquad (125)$$

Отсюда определяется $k$ по двум наблюдательным скважинам

$$k=[0{,}183Q/m\,(S_{max_1}-S_{max_2})]\ln(r_2/r_1). \qquad (126)$$

Точка перегиба (рис. 26) $S=S_m/2$ и наступает при $t=rB/2a$. Уклон в точке перегиба определяется по формуле

$$C=0{,}183Q/km. \qquad (127)$$

Отношения между понижением $S_0$ и уклоном касательной в точке $b_0$ определяется соотношением

$$2,3\,(S_0/C) = F\,(r/B),\ \ F\,(r/B) = e^{r/B}\ K_0\,(r/B). \qquad (128)$$

Отсюда определяется величина $B$ — параметр перетекания.

Параметры $a$ и $k$ определяются соответственно по формуле

$$a = rB/2t_0,\ \ k = (0,08Q/S_0)\,K_0\,(r/B) \qquad (129)$$

или

$$k = (0,183Q/C)\exp(-r/B). \qquad (130)$$

Коэффициент $C$ определяется на основании данных графика $S = f(\lg t)$ по формуле

$$C = (S_2 - S_1)/(\lg t_2 - \lg t_1), \qquad (131)$$

где $S_2$ и $S_1$ — ординаты касательной.

При известном $k$ и $B$ определяется $k_0$.

$$k_0 = m_0\,km/B^2. \qquad (132)$$

Пьезопроводность пласта при известных $B$, $r$, $t$ и $km$ может быть определена из (123) с помощью таблиц $W_{\text{п}}(U, r)$.

Используя (124) и данные по центральной и наблюдательной скважинам с учетом дополнительного сопротивления, на основе применения метода произвольных точек определяем параметр $B$

$$S_0/S_1 = [K_0\,(r_0/B) + \zeta_0]/[K_0\,(r_1/B) + \zeta_{01}]. \qquad (133)$$

Величина $k$ определяется из (124)

$$k = (Q/2\pi mS_{m1})[K_0\,(r_1/B) + \zeta_{01}]. \qquad (134)$$

При известном $B$, $k$ и $m_0$ находится $k_0 = m_0mk/B^2$.

Для определения параметров может быть использован также метод эталонной кривой [21, 26], учитывая его недостатки, он здесь не рассматривается.

2. Напор в горизонтах, из которых происходит переток, изменяется. Коэффициенты пьезопроводности в двух горизонтах равны (рассматривается условие перетока только из одного верхнего горизонта в нижний через слабопроницаемый слой).

При откачке с постоянным расходом из нижнего горизонта (рис. 27) понижение в нем $S_1$ и в соседнем горизонте $S_2$ определяется по формулам [26]:

$$S_1 = (Q/4\pi T)\,[W\,(U) + T_2/T_1\,W\,(U, \bar{r})]; \qquad (135)$$

$$S_2 = (Q/4\pi T)\,[W\,(U) - W\,(U, \bar{r})]; \qquad (136)$$

$$T = k_1\,m_1 + k_2\,m_2;\ \ B = \sqrt{k_1\,k_2\,mm_0/k_0\,T}\,,$$

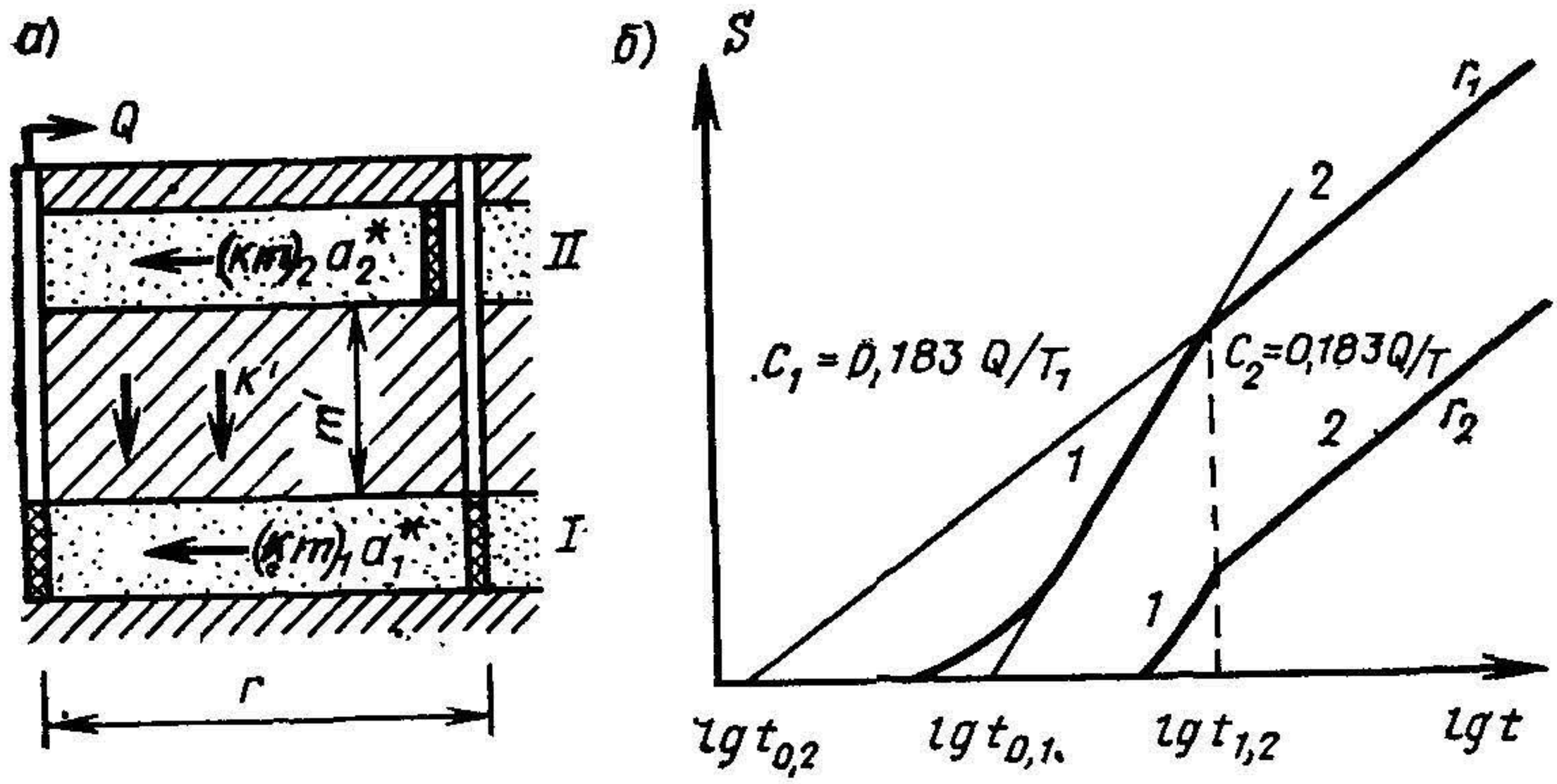



Рис. 27. Перетекание в двухпластовой системе

*а* — фильтрационная схема; *б* — график снижения напора

где $T_1$ и $T_2$ — проводимости первого и второго относительно хорошо проницаемых пластов.

При больших значениях $U$ (начальный период откачки) влияние откачки на снижение напора в верхнем горизонте не сказывается, т. е. $S_2=0$, а закономерность снижения напора в первом (нижнем) горизонте описывается уравнением

$$S_1 = (0,08Q/k_1 m_1)\, W(U). \tag{137}$$

При $t>2,78\ r^2/a$ понижение в этом горизонте определяется по формуле

$$S_1 = (Q/4\pi k_1 m_1) \ln (2,25a_1 t/r^2). \tag{138}$$

В период квазистационарного режима, когда процесс перераспределения давления в обоих слоях закончился, вместо (135) и (136) имеем:

$$S_1 = (Q/4\pi T)\, [\ln (2,25a_1 t/r^2) + 2\delta K_0 (r/B)]; \tag{139}$$

$$S_2 = (Q/4\pi T)\, [\ln (2,25a_1 t/r^2) - 2K_0 (r/B)]. \tag{140}$$

График $S=f\lg(t)$ имеет два прямолинейных участка, уклоны которых определяются зависимостями

$$C_1 = 0,183\,(Q/T_1) \text{ и } C_2 = 0,183\,(Q/T). \tag{141}$$

Из (141) находятся $T_1$ и $T$, определяются $k_1$ и $k_2$

$$k_1 = 0,183\, Q/m_1 C_1; \quad k_2 = (T - T_1)/m_2. \tag{142}$$

В точке сопряжения этих участков соблюдается равенство

$$\ln (2,25a_1 t/r^2) = 2K_0 (r/B). \tag{143}$$

Из (138) при известном $T_1$ определяем $a_1$

$$a_1 = 0,445\left(r_1^2/t_1\right)\exp\left(4\pi T_1/Q\right). \tag{144}$$

При известном $a_1$ из (143) находится $B$

$$K_0(r/B) = 0,5\ln\left(2,25a_1\, t/r_1^2\right). \tag{145}$$

Коэффициент фильтрации $k_0$ определяется по формуле

$$k_0 = (k_1\, k_2\, m_1\, m_2\, m_0)/[(k_1\, m_1 + k_2\, m_2)\, B^2]. \tag{146}$$

При наличии в верхнем горизонте наблюдательной скважины расчет может проводиться по формуле

$$\Delta S = S_1 - S_2 = (Q/4\pi k_1\, m_1)\; W\left(U,\ \bar{r}\right). \tag{147}$$

Определение параметров производится по тем же зависимостям, как и при перетекании из водоносного горизонта с постоянным напором.

**5.28.** *Определение параметров при упругом режиме фильтрации* в разделяющем слое, который оказывает существенное влияние на откачку при значительной сжимаемости пород этого слоя.

Основная расчетная зависимость имеет вид

$$S = (Q/4\pi km)\,\mathrm{H}\,(U,\ \gamma), \tag{148}$$

где $\mathrm{H}(U\gamma)$ — функция Хантуша, см. табл. 22; $U = r^2/4at$, $\gamma = 0,25r\lambda$, $\lambda = (k_0/k_1 m_1)\sqrt{a_1/a_0}$, $a_0 = k_0 m_0/\mu_0^*$, $a_1 = k_1 m_1/\mu_1^*$. Эта формула получена для относительно малых значений времени при $t < 0,25m_0^2/a_0$, пока влияние смежного пласта не сказывается на результатах откачки из основного пласта.

При $\sqrt{pt} < 0,1$—$0,2$, $[p = (k_0/\mu^* m_0)\,(\mu_0^*/\mu^*)^2]$ справедливо решение Тейса, т. е. $\mathrm{H}(U,\ \gamma) \approx W(U)$.

При $U > 10^4\gamma^2$ вместо (148) имеем

$$\mathrm{H}\,(U,\ \gamma) \approx 0,5\ln\left(0,44/U\gamma^2\right) \tag{149}$$

или

$$S_1 = (Q/4\pi km)\ln\left(2,8(km)^2\, a_0\, t/k_0^2\, r^4\right). \tag{150}$$

Это уравнение прямой $S = f(\lg t)$;

$$S = A + C\lg t; \tag{151}$$

где

$$A = C\lg\left(2,8\,(km)^2\, a_0\, t_0/r^4\, k_0^2\right); \tag{152}$$

$$C = (2,3Q/8\pi km) = [S\,(t_2) - S\,(t_1)]\Big/\lg\frac{t_2}{t_1}. \tag{153}$$

Таблица 22

| $U$ | $\nu$ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $1\cdot10^{-3}$ | $5\cdot10^{-3}$ | $1\cdot10^{-2}$ | $5\cdot10^{-2}$ | $1\cdot10^{-1}$ | $2\cdot10^{-1}$ | $5\cdot10^{-1}$ | 1 | 2 | 3 |
| $2\cdot10^{-6}$ | 11,536 | 10,221 | 9,568 | 7,991 | 7,302 | 6,613 | 5,701 | 5,014 | 4,331 | 3,441 |
| $4\cdot10^{-6}$ | 11,057 | 9,842 | 9,205 | 7,642 | 6,995 | 6,226 | 5,357 | 4,672 | 3,992 | 3,111 |
| $6\cdot10^{-6}$ | 10,762 | 9,615 | 8,989 | 7,437 | 6,751 | 6,064 | 5,156 | 4,472 | 3,795 | 2,920 |
| $8\cdot10^{-6}$ | 10,546 | 9,450 | 8,835 | 7,290 | 6,607 | 5,920 | 5,013 | 4,4331 | 3,565 | 2,786 |
| $2\cdot10^{-5}$ | 9,820 | 8,904 | 8,322 | 6,824 | 6,145 | 5,462 | 4,560 | 3,882 | 3,216 | 2,366 |
| $4\cdot10^{-5}$ | 9,236 | 8,465 | 7,945 | 6,468 | 5,795 | 5,116 | 4,219 | 3,547 | 2,889 | 2,059 |
| $6\cdot10^{-5}$ | 8,882 | 8,194 | 7,694 | 6,258 | 5,590 | 4,913 | 3,020 | 3,352 | 2,700 | 1,884 |
| $8\cdot10^{-5}$ | 8,627 | 7,996 | 7,519 | 6,108 | 5,443 | 4,770 | 3,879 | 3,214 | 2,568 | 1,763 |
| $2\cdot10^{-4}$ | 7,790 | 7,328 | 6,932 | 5,623 | 4,975 | 4,311 | 3,433 | 2,782 | 2,155 | 1,394 |
| $4\cdot10^{-4}$ | 7,139 | 6,784 | 6,454 | 5,246 | 4,616 | 3,964 | 3,100 | 2,462 | 1,854 | 1,135 |
| $6\cdot10^{-4}$ | 6,753 | 6,452 | 6,160 | 5,020 | 4,404 | 3,761 | 2,906 | 2,278 | 1,685 | 0,994 |
| $8\cdot10^{-4}$ | 6,477 | 6,210 | 5,944 | 4,857 | 4,252 | 3,617 | 2,770 | 2,149 | 1,567 | 0,898 |
| $2\cdot10^{-3}$ | 5,590 | 5,412 | 5,220 | 4,318 | 3,760 | 3,155 | 2,342 | 1,752 | 1,212 | 0,624 |
| $4\cdot10^{-3}$ | 4,914 | 4,784 | 4,640 | 3,886 | 3,375 | 2,803 | 2,025 | 1,466 | 0,966 | 0,450 |
| $6\cdot10^{-3}$ | 4,516 | 4,410 | 4,289 | 3,621 | 3,144 | 2,596 | 1,844 | 1,305 | 0,833 | 0,362 |
| $8\cdot10^{-3}$ | 4,235 | 4,142 | 4,036 | 3,428 | 2,976 | 2,448 | 1,717 | 1,195 | 0,744 | 0,306 |
| $2\cdot10^{-2}$ | 3,340 | 3,282 | 3,213 | 2,783 | 2,423 | 1,971 | 1,324 | 0,868 | 0,491 | 0,166 |
| $4\cdot10^{-2}$ | 2,671 | 2,632 | 2,584 | 2,269 | 1,984 | 1,606 | 1,042 | 0,647 | 0,336 | 0,093 |
| $6\cdot10^{-2}$ | 2,287 | 2,256 | 2,219 | 1,963 | 1,722 | 1,391 | 0,884 | 0,530 | 0,259 | 0,063 |
| $8\cdot10^{-2}$ | 2,020 | 1,994 | 1,963 | 1,745 | 1,534 | 1,238 | 0,776 | 0,453 | 0,212 | 0,046 |
| $2\cdot10^{-1}$ | 1,219 | 1,206 | 1,190 | 1,071 | 0,950 | 0,767 | 0,460 | 0,245 | 0,097 | 0,014 |
| $4\cdot10^{-1}$ | 0,701 | 0,694 | 0,685 | 0,622 | 0,554 | 0,448 | 0,262 | 0,130 | 0,044 | 0,004 |
| $6\cdot10^{-1}$ | 0,453 | 0,449 | 0,444 | 0,404 | 0,361 | 0,293 | 0,169 | 0,080 | 0,025 | 0,002 |
| $8\cdot10^{-1}$ | 0,310 | 0,307 | 0,304 | 0,277 | 0,248 | 0,201 | 0,115 | 0,053 | 0,015 | 0,001 |
| 2,0 | $488\cdot10^{-4}$ | | $479\cdot10^{-4}$ | | $395\cdot10^{-4}$ | $322\cdot10^{-4}$ | $180\cdot10^{-4}$ | $760\cdot10^{-5}$ | $173\cdot10^{-5}$ | $551\cdot10^{-7}$ |
| 4,0 | $377\cdot10^{-5}$ | | $370\cdot10^{-5}$ | | $307\cdot10^{-5}$ | $250\cdot10^{-5}$ | $139\cdot10^{-5}$ | $138\cdot10^{-6}$ | $158\cdot10^{-6}$ | $189\cdot10^{-8}$ |

Отсюда определяется

$$k = 2,3Q/8\pi Cm. \qquad (154)$$

График $S=f(\lg t)$ имеет два прямолинейных участка. Продлив первый участок до пересечения с осью $\lg t$, получим при $S=0$ $A=-C(\lg t)$ и определим величину $a_0$ при известном $k_0$

$$a_0 = 0,357\left(r_1^2/t_0\right)\left(k_0 r_1/km\right)^2 \exp(2,3A/C). \qquad (155)$$

При известном $k$ определим по наблюдательной скважине на момент времени $t_1$ функцию

$$\mathrm{H}(U,\ \gamma) = 4\pi kmS_1/Q. \qquad (156)$$

Учитывая, что при известных $r_1$ и $t_1$, $U(a)=r_1^2/4a$ и $\gamma=(k_0r_1/4km\sqrt{a_0})/\sqrt{a}=\gamma(a)$, так как $k_0/\sqrt{a_0}$ определяется из (155), получим

$$\mathrm{H}(a) = 4\pi kmS_1/Q. \qquad (157)$$

Отсюда задаваясь различными значениями параметра $a$ по табл. 22, найдем то его значение, которое будет отвечать равенству (157). Затем определяется величина $\mu^*=km/a$. Более удобно использовать в качестве расчетной зависимости следующую [13]:

$$S(r,\ t) = (Q/2\pi km)\left[\ln(R(t)/r) - 1 + (r/R(t)\right], \qquad (158)$$

где $R(t)$ — условный радиус влияния в момент времени от начала откачки

$$R^2(t) = (6a/p)\left[2\sqrt{pt} - 1 + \exp\left(2\sqrt{pt}\right)\right], \qquad (159)$$

где $p=(k_0a)^2/a_0(km)^2$.

По разности понижений $\Delta S$ в двух ближайших наблюдательных скважинах (на момент времени в конечный период откачки), удаленных от центральной на $r_1$ и $r_2$, определяется по формуле Дюпюи ($k$). Затем по (158) находится $R(t)$ и уточненное значение $k$ по формуле

$$k = (Q/2\pi m\Delta S)(\ln(r_2/r_1) - (r_2 - r_1)/R(t)]. \qquad (160)$$

Далее по уточненному значению $k$ по (158) находится значение $R^2(t)$ — осредненное для различных (двух) скважин.

Величина $R(t)$ на момент времени $t_1$ по показаниям двух наблюдательных скважин может быть также определена методом последовательных приближений из выражения

$$\frac{S(r_2,\ t_1)}{S(r_1,\ t_1)} = \left[\ln\left(\frac{R(t_1)}{r_2}\right) - 1 + \frac{r_2}{R(t_1)}\right] \Big/ \left[\ln\left(\frac{R(t_1)}{r_1}\right) - 1 + \frac{r_1}{R(t_1)}\right]. \qquad (161)$$

Для упрощения расчетов может быть использован график (рис. 28). Из выражения (161) при известном $R(t_1)$ находится параметр $k$.

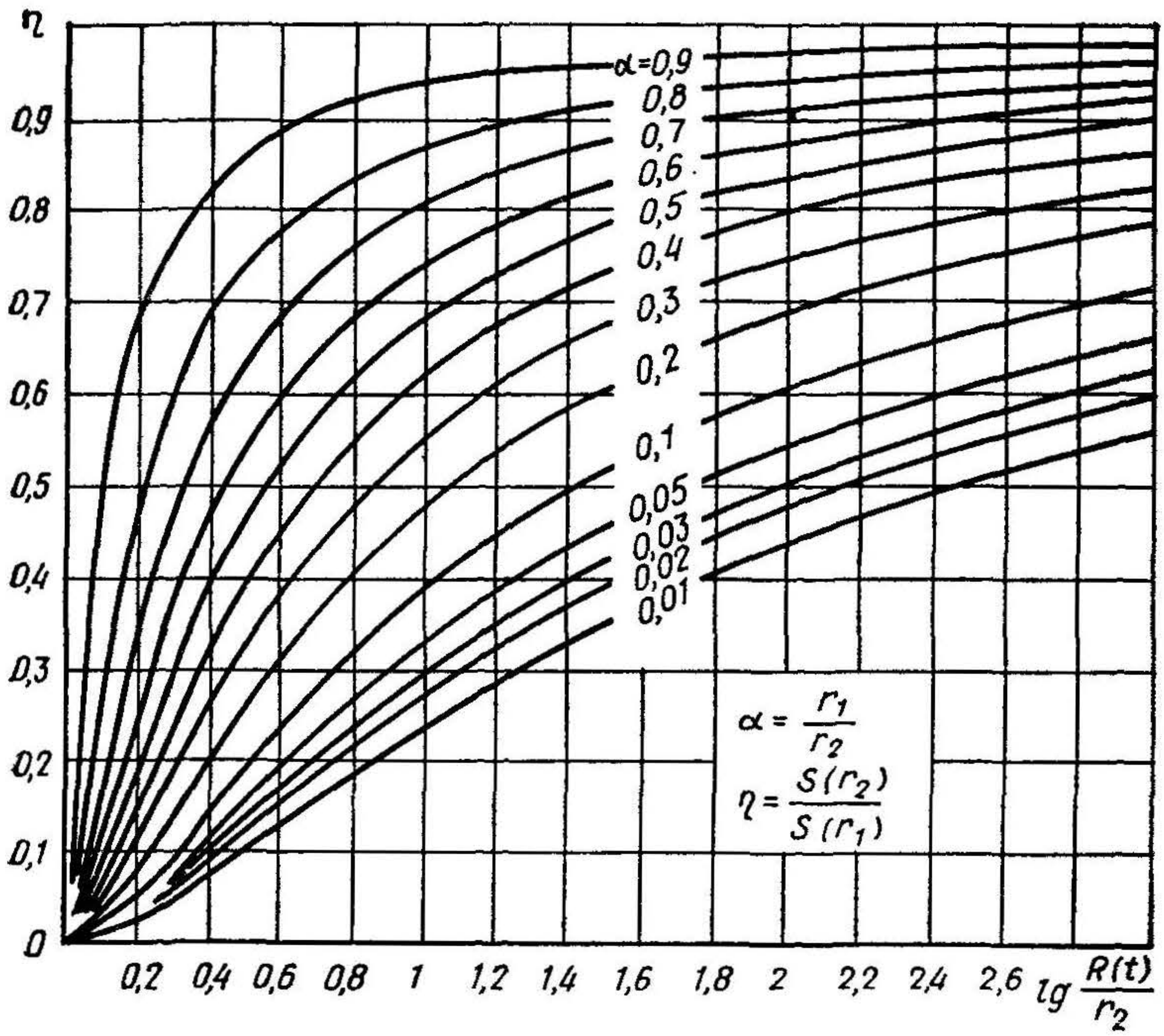



Рис. 28. Вспомогательный график для определения $R(t)$

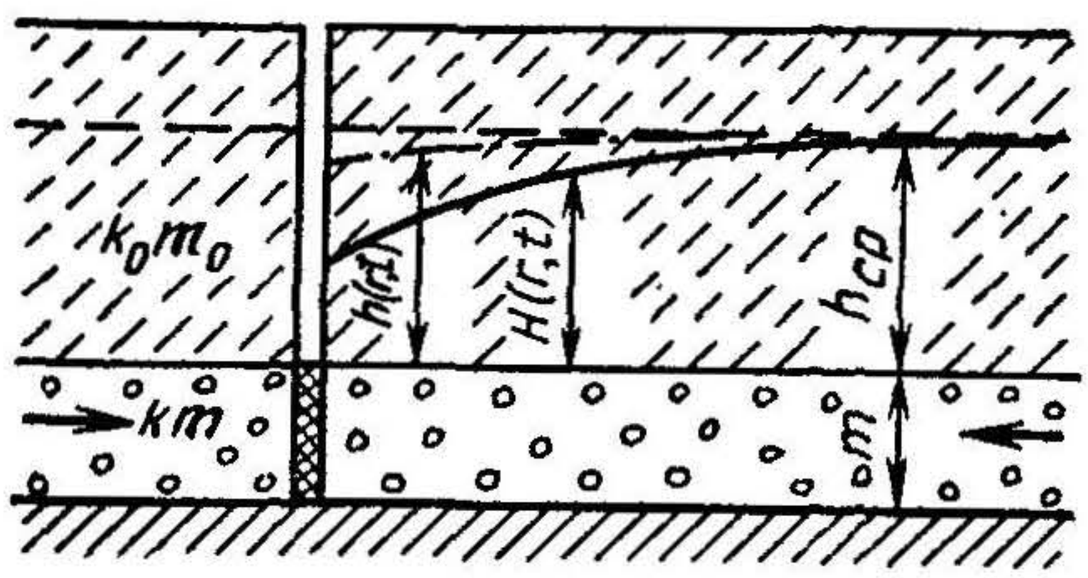



Рис. 29. Схема строения двухслойной толщи

Найдя $S_1(r_1, t_2)$ и $S_2(r_2, t_2)$ на второй момент времени находим $R(t_2)$. Затем используя (159), получим выражение для определения параметра $p$ методом последовательных приближений

$$R^2(t_1)/R^2(t_2) = \left[2\sqrt{pt_1} - 1 + \exp\left(-2\sqrt{pt_1}\right)\right] / \left[2\sqrt{pt_2} - 1 + \exp\left(-2\sqrt{pt_2}\right)\right]. \quad (162)$$

Далее из (159) при известном $p$ находится параметр $a$.

Для определения $a_0$ необходимо, как и в первом случае, определить независимым путем $k_0$, например, в лабораторных условиях.

Тогда параметр $a_0$ определится по формуле

$$a_0 = (1/p)(k_0\, a/km)^2. \qquad (163)$$

**5.29.** *Определение параметров в двухслойном пласте:* напорный пласт с высокой проницаемостью перекрыт (рис. 29) слабопроницаемым безнапорным водоносным горизонтом. Оба горизонта имеют общий уровень (со свободной поверхностью в верхнем и напорной — в нижнем). Этот случай является одним из наиболее типичных.

В начальный период (первый этап) откачки происходит сработка упругих запасов. В этот период сработки уровня в верхнем слое не происходит. Методика определения параметров на этом этапе такая же, как в приведенном выше для напорных пластов с учетом перетекания. При этом рассматриваемый этап включает три периода времени: 1 — упругий режим изолированного напорного пласта (по уравнению Тейса), его продолжительность характеризуется $t_{\text{уп}} < (0{,}01—0{,}04)\dfrac{1}{p}$; 2 — упругое перетекание (по уравнению Хантуша $H(U, \gamma)$, его продолжительность характеризуется $t_{\text{уп}} = 0{,}1 m_0 \mu_0^* / k_0$; 3 — начало перетекания из горизонта со свободной поверхностью (по уравнению $W(U, \bar{r})$ для перетока с постоянным напором).

Второй этап — начинают срабатываться запасы гравитационной емкости покровного слоя и снижаются уровни свободной поверхности, что приводит к кажущейся стабилизации напоров в нижнем пласте — возникает ложностационарный режим. Определение параметров проводится на основе использования зависимостей

$$S_{\max} = Q K_0 (r/B)/2\pi km. \qquad (164)$$

Третий этап — снижение напора определяется целиком гравитационной водоотдачей $\mu_0$. Конечный участок графика является представительным участком для данного этапа. Он возникает через время

$$t \geqslant 5\,\frac{\mu_0 h_{\text{ср}}}{k_0}, \qquad (165)$$

где $h_{\text{ср}}$ — средняя мощность безнапорного водоносного горизонта (верхнего).

При этом принимается два допущения: снижение напоров в обоих слоях происходит синхронно, переток гравитационной воды из верхнего слоя со сниженным напором в нижний слой происходит без запаздывания. Обработка данных производится как для напорного пласта способами временного, площадного или комбинированного прослеживания. Если проницаемость верхнего слоя очень низкая, то для расчета параметров целесообразно использовать следующее уравнение:

$$S(r, t) = (Q/2\pi km)\,[\ln(R(t)/r) - 1 + (r/(R(t))], \qquad (166)$$

$$R^2(t) = (12a/\alpha)\,\{[t - (1-\alpha)/\alpha]\,[1 - \exp(-\alpha\beta_0 t)]\}, \qquad (167)$$

где $a=T/\mu^*$, $\alpha=(\mu_0+\mu^*)/\mu^*$, $\beta_0=k_0/\mu_0 h_{ср}$,
где $\mu_0$ $k_0$ — водоотдача и коэффициент фильтрации верхнего слоя.
При $\mu_0 \gg \mu^*$ и $t>(3-5)\mu^* h_{ср}/k_0$ имеем

$$R^2(t)=(12km/\mu_0)(t+(1/\beta_0)). \qquad (168)$$

Как и ранее по (158) и (160), определяется параметр на два момента времени.

Далее определяется с учетом (168)

$$\beta=(1-[R(t_1)/R(t_2)]^2)/([R(t_1)/R(t_2)]^2(t_2-t_1). \qquad (169)$$

При известном $\beta$ определяются $\mu_0$ и $k_0$

$$\mu_0=(12km/R^2(t)(t_1+(1/\beta)),\ k_0=\beta\mu_0 h_{ср}. \qquad (170)$$

## Откачки в породах, имеющих специфические фильтрационные свойства

**5.30.** Трещиноватые и закарстованные породы характеризуются существенной неоднородностью и анизотропией фильтрационных и емкостных свойств. Указанные породы с гидродинамической точки зрения рассматриваются как породы с двойной пористостью — две среды, вложенные одна в другую:

первая среда — макротрещины (отдельные тектонические зоны, карстовые полости и каналы) определяют в основном проницаемость пород; система этих пустот характеризуется низкой емкостью и высокой пьезопроводностью (уровнепроводностью);

вторая среда — блоки породы, разделяемые макротрещинами, обладающие пустотами второго порядка (порами) определяют в основном емкостные свойства; система этих пустот характеризуется повышенной емкостью и относительно низкой пьезопроводностью. Указанные системы гидравлически связаны путем перетока из блоков в трещины.

По условиям фильтрации рассматриваемые породы разделяются на следующие типы:

1. Трещиноватая порода, в которой блоки непроницаемы и их пористость весьма мала; основные запасы жидкости содержатся в трещинах (трещины характеризуются раскрытием одного порядка);

2. Трещиновато-пористые породы — проницаемость грунта определяется преимущественно трещинами, а пористость — пористостью блоков, в редких случаях пористость систем может быть сопоставима.

3. Трещинно-трещинные — породы с двумя и более системами трещин разного раскрытия (на густую сеть микротрещин различного генезиса наложена относительно редкая сеть более крупных трещин); закономерность фильтрации в породах с «двойной пористо-

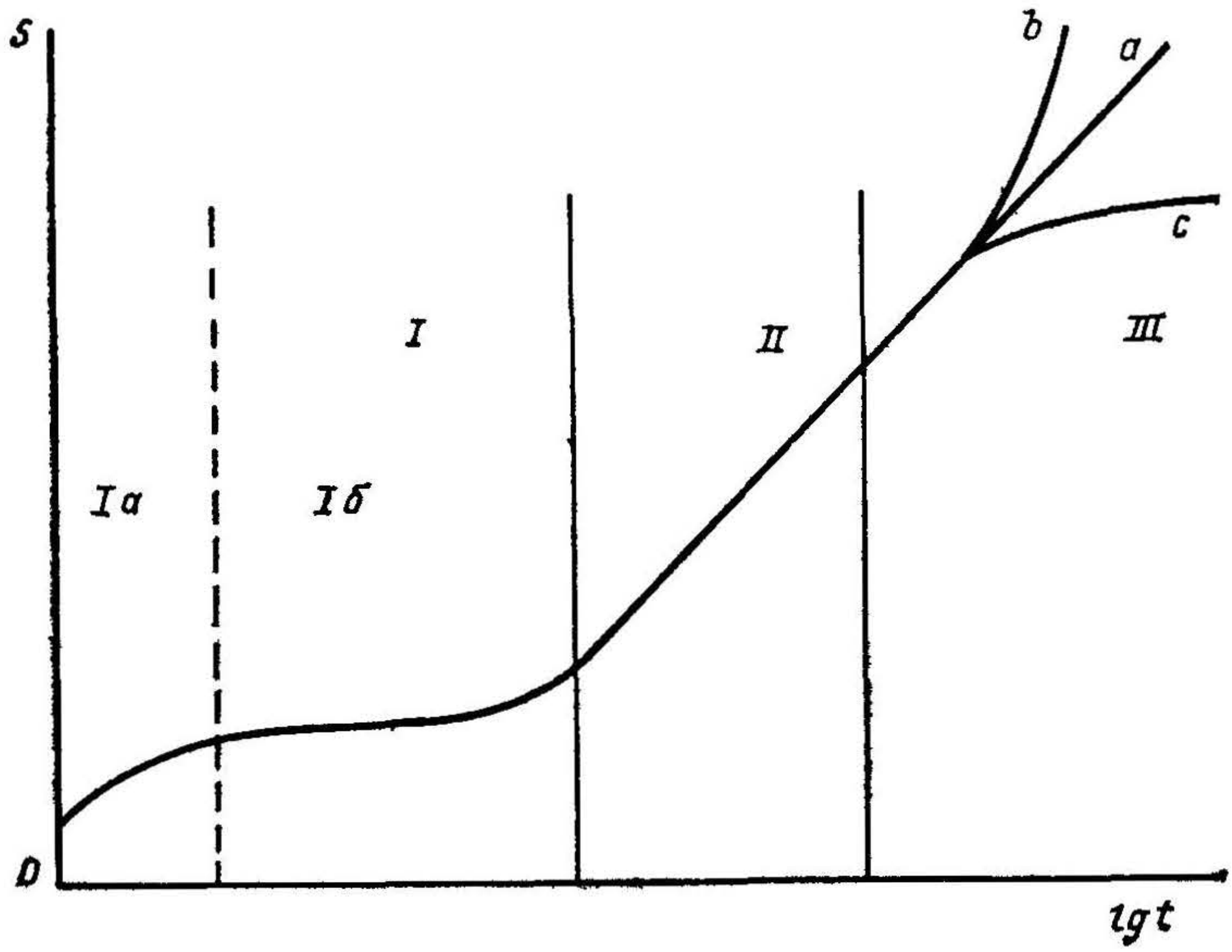



Рис. 30. Характерная форма графиков прослеживания $S=f(\lg t)$ при откачке из трещинно-карстовых пород

стью» хорошо описывается формулами Тейса-Джекоба, однако использование этих формул может быть осуществлено только через некоторое время $\tau$, т. е. с запаздыванием.

Время $\tau$ характеризует период выравнивания напоров в двух системах и характеризуется следующим соотношением:

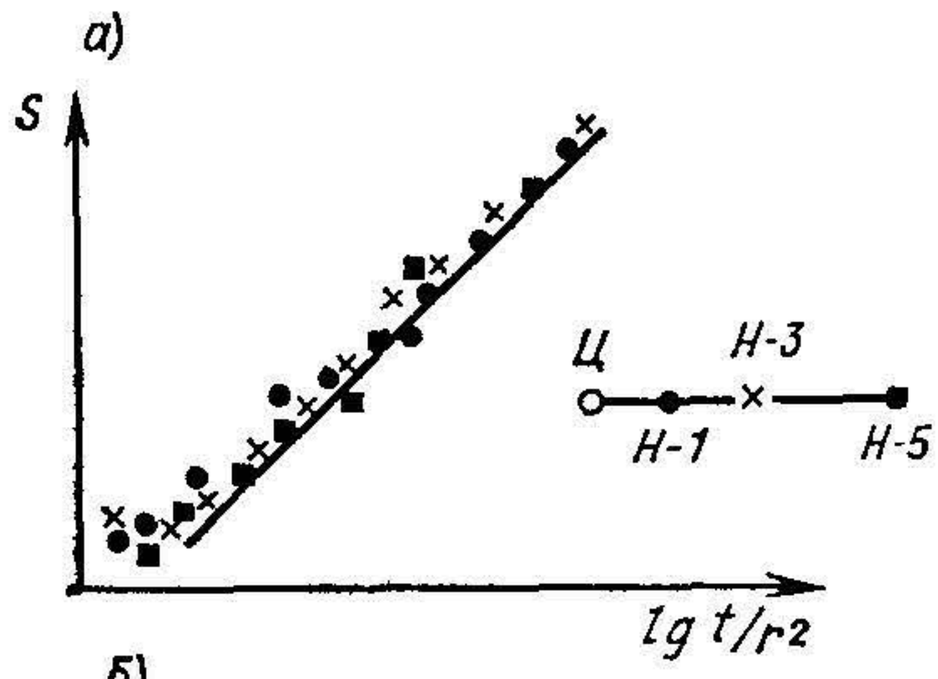
$$\tau = k_1 l^2 / k_2 a, \tag{171}$$

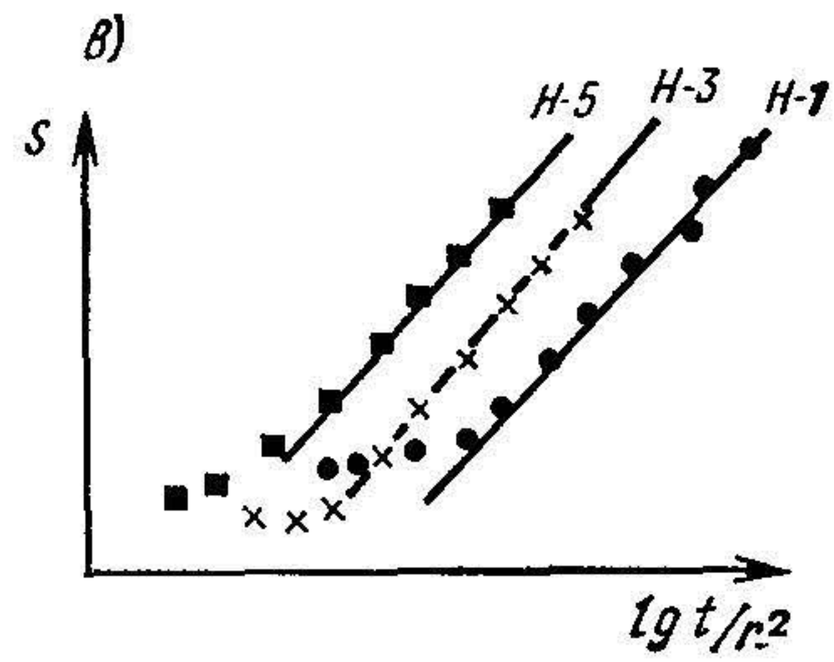
где $k_1$ и $k_2$ — коэффициенты фильтрации соответственно пород первой и второй систем, $l$ — средний размер блока, $a$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности), $a=k_1/\beta_2+n_2\beta$; $\beta_2$ — сжимаемость второй среды (блоков), $\beta$ — сжимаемость жидкости.

Таким образом, фильтрация в грунтах с «двойной пористостью» через промежуток времени $\tau$ осуществляется так же, как и в обычной пористой среде.

Определить величину $\tau$ до проведения откачки практически невозможно, она определяется только путем анализа данных откачек. На графиках $S$—$\lg t$ выделяется 3 участка (рис. 30):

первый участок на указанном графике свидетельствует о том, что исследуемый пласт обладает «двойной пористостью». Причем если $k_1 \gg k_2$ и $n_1 \ll n_2$, то движение жидкости аналогично движению в двухслойном пласте без разделяющего слоя со слабопроницаемым безнапорным верхним. Нижний рассматривается как



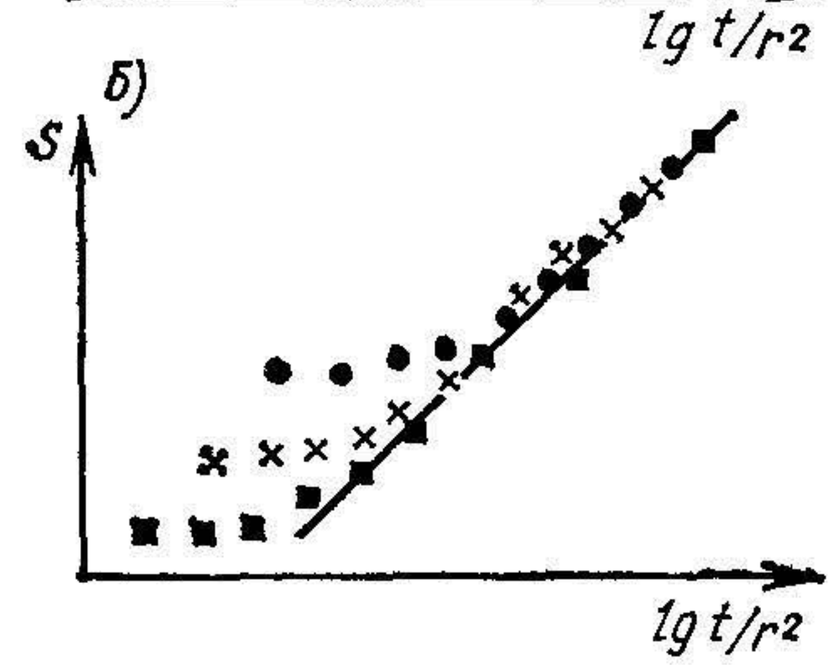




Рис. 31. Характерные формы графиков комбинированного прослеживания $S=f(\lg t/r^2)$ при откачках из трещинно-карстовых пластов

*а* — графики формируются без запаздывания, эффект двойной пористости не проявляется; *б* — графики с общим асимптотическим участком, формируются с запаздыванием; *в* — графики с параллельными асимптотическими участками, формируются с запаздыванием, характерным для интенсивно трещиноватых и закарстованных пород; скважины: Ц — центральная; Н-1, Н-3, Н-5 — наблюдательные

аналог трещин, верхний — пористых блоков. Этот участок графика соответствует периоду ложностационарного режима фильтрации и характеризует параметры хорошо проницаемой первой среды. Однако первый участок (крутая ветвь *1а*) чаще всего вырождается, что отражается в виде скачка уровня в начале откачки. Его продолжительность от нескольких минут до сотен часов. При относительно близких значениях пористости (упругоемкости) двух сред этот участок вообще может отсутствовать;

второй участок — этот участок отвечает условиям фильтрации в обычной пористой среде. Он является одним из основных и по нему определяются параметры, характеризующие осредненные фильтрационные и емкостные свойства водовмещающей породы в целом;

наилучшие результаты при диагностике расчетных графиков дают результаты комбинированного прослеживания, которые в зависимости от структуры трещинной или трещинно-карстовой среды и соотношения фильтрационных и емкостных свойств пустот могут быть представлены (рис. 31):

а) общим полулогарифмическим графиком, формирующимся без запаздывания, когда эффект «двойной пористости» практически не проявляется;

б) графиками, аналогичными графикам при откачках из безнапорных пластов (эффект Боултона) с общими асимптотическими участками, формирующимися с запаздыванием;

в) семейством графиков с параллельными асимптотическими участками, формирующимися с запаздыванием.

В первых двух случаях обработка результатов опытов производится как в обычных пористых средах. При этом определенные параметры по временным, комбинированным и площадным графикам прослеживания совпадают, а в последнем случае расчеты по графикам площадного прослеживания дают завышенные результаты, что особенно характерно для интенсивно трещиноватых и закарстованных пород.

В качестве расчетных следует в этих случаях принимать коэффициенты $a$, полученные по наблюдательным скважинам, удаленным от опытной $r \geqslant (1{,}5—2)\,m$.

Третий участок — связан с макронеоднородностью водоносного горизонта или с влиянием внешних границ пласта, что приводит на временных или комбинированных графиках прослеживания к появлению конечного участка более крутого (рис. 30, IIIб — непроницаемый контур), более пологого (рис. 30, IIIв — контур питания) или график не изменяет свою форму (рис. 30, IIIа — влияние границ еще не сказалось). В некоторых случаях влияние границ деформирует характерную форму графика, не позволяя выделить в графиках расчетного участка; в этом случае использовать метод Джейкоба невозможно.

При выборе расчетных временных и комбинированных графиков критерий контрольного времени в данных условиях неприменим; их выбор осуществляется только на основе качественного анализа опытных закономерностей изменения уровня в процессе откачек.

В пластах с резко неравномерной трещиноватостью параметры $k$ и $a$ могут быть определены только по временным и комбинированным графикам прослеживания, метод площадного прослеживания уровня неприменим.

Для правомерности обработки результатов откачек (с точностью до 10 %) без учета влияния границ необходимо: а) для метода временного и комбинированного прослеживания изменения уровня используются наблюдательные скважины на расстоянии $r_i \leqslant 0{,}3L$ от опытной ($L$ — расстояние от опытной скважины до ближайшей границы пласта); б) для способа площадного прослеживания изменения уровня — $r_i \leqslant 0{,}45L$.

**5.31.** Анизотропные породы — это породы, в которых коэффициент фильтрации зависит от направления фильтрации. Взаимно перпендикулярные направления, по которым коэффициент фильтрации имеет минимальное $k_{min}$ или максимальное значение $k_{max}$, называются главными направлениями анизотропии. Анизотропные породы делятся на однородные, в которых $k_{min}$ и $k_{max}$ не зависят от координат области фильтрации, и неоднородные, в которых $k_{min}$ и $k_{max}$

зависят не только от направления фильтрации, но и от координат области фильтрации. Фильтрационная анизотропия характеризуется соответствующим коэффициентом $\lambda=\sqrt{k_1/k_2}$, где $k_1$, $k_2$ — коэффициенты фильтрации в соответствующих направлениях.

### Анизотропные породы в вертикальном направлении

Коэффициент анизотропии определяется величиной $\lambda_в=\sqrt{k_в/k_г}$, где $k_в$ и $k_г$ — коэффициенты фильтрации соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Определение коэффициентов фильтрации $k_в$ и $k_г$ осуществляется на основе кустовой откачки. На каждом луче опытного куста закладывается по четыре скважины в соответствии с расчетной схемой (рис. 32), при этом соблюдаются следующие условия:

а) фильтр скважины не примыкает к водоупорному слою;

б) фильтр центральной скважины располагается примерно в середине изучаемого водоносного пласта и имеет длину меньше $^1/_3$—$^1/_4$ мощности водоносного пласта;

в) длина фильтра наблюдательных скважин не превышает 0,5 длины фильтра центральной скважины;

г) фильтры наблюдательных скважин располагаются на двух горизонтах посередине одного ряда фильтров наблюдательных скважин на плоскости, проходящей через середину фильтра центральной скважины, а фильтры второго ряда — выше или ниже центральной скважины;

д) ближайшие к соответствующей границе слоя концы фильтров наблюдательных скважин должны отстоять от нее на расстоянии не менее длины фильтра центральной скважины;

е) расстояние крайней наблюдательной скважины от центральной не должно превышать $^1/_3$—$^1/_2$ мощности изучаемого водоносного слоя.

Расчет коэффициентов фильтрации производится для пары наблюдательных скважин по формулам:

$$\frac{S_i'}{S_i}=\frac{\operatorname{arch}\dfrac{0,5l_0+z_1}{r_i\lambda}-\operatorname{arch}\dfrac{z_1-0,5l_0}{r_i\lambda}}{2\operatorname{arsh}\dfrac{0,5l_0}{r_i\lambda}}, \qquad (172)$$

$$k_r=\left[Q/4\pi l_0(S_i-S_i')\right]\left[2\operatorname{arsh}(0,5l_0/r_i\lambda)+\operatorname{arch}((z_1-0,5l_0)/r_i\lambda)-\right.$$
$$\left.-\operatorname{arch}(0,5l_0+z_1)/r_i\lambda\right], \qquad (173)$$

где $S_i'$ — понижение уровня воды в скважине с фильтром, расположенным выше или ниже фильтра центральной скважины; $S_i$ — понижение уровня воды в скважине с фильтром, расположенным в середине опробуемого пласта; $r_i$ — расстояние данной пары наблюдательных скважин от центральной; $z_1$ — расстояние от середины фильтра наблюдательной до горизонтальной плоскости, проведенной через середину фильтра центральной скважины; $l_0$ — длина фильтра центральной скважины; $\lambda$ — определяется из (172) методом последовательных приближений.

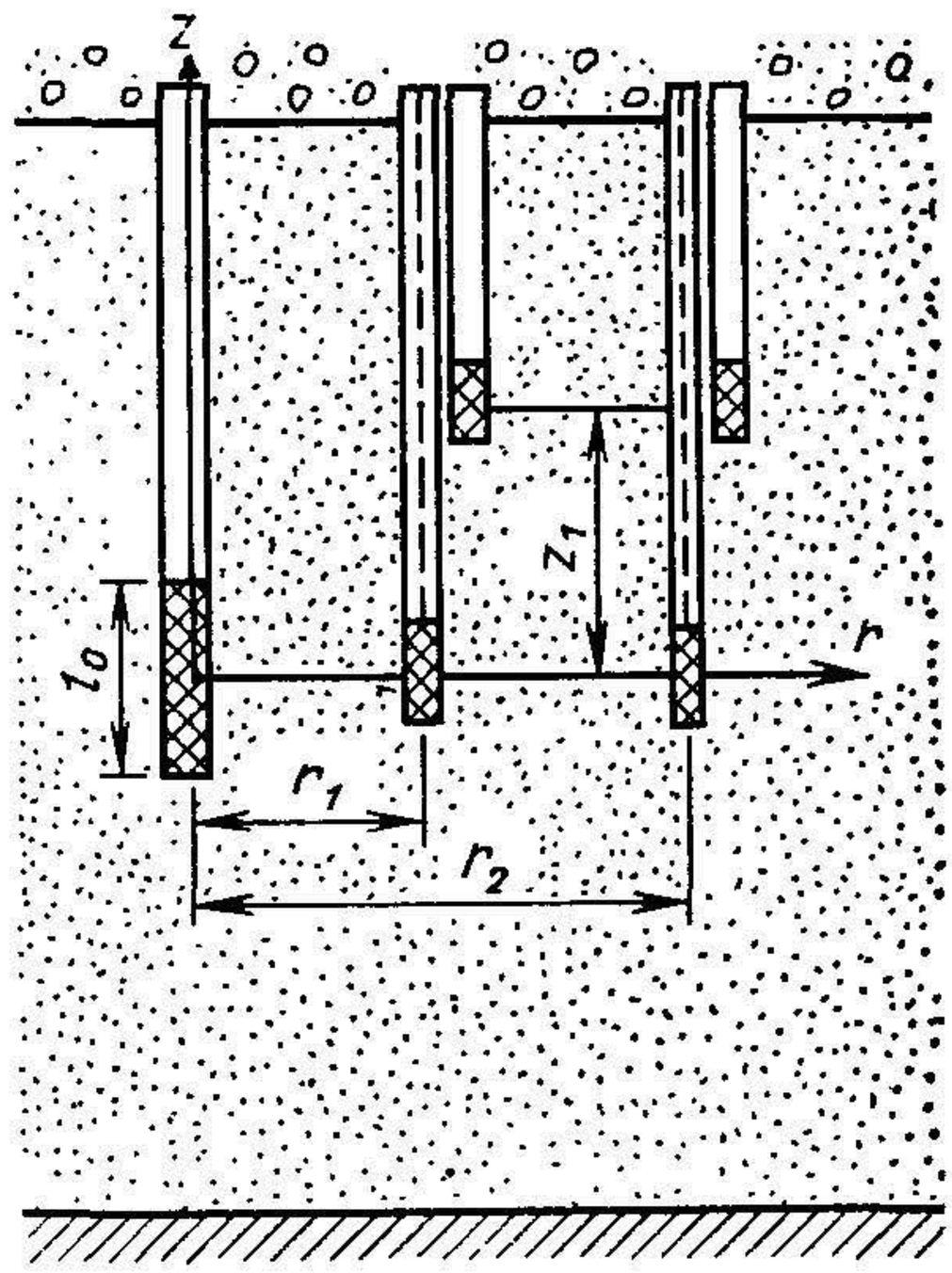



Рис. 32. Схема установки фильтров в однородно-анизотропной толще

Если фильтры центральной и наблюдательных скважин примыкают к водоупорному слою, то в приведенные формулы вводятся следующие изменения:

а) в аргументы функции ars$h$ вместо $0{,}5l_0$ входит $l_0$;

б) для скважин с фильтрами, примыкающими к водоупорному слою $z_1=0$, а для наблюдательных скважин с фильтрами, не примыкающими к водоупорному слою, $z_1$, равно расстоянию от середины фильтра до водоупорного слоя, для пород, анизотропных в плане (трещиноватые), определения параметров осуществляется по данным кустовой откачки в условиях квазиустановившегося режима.

Основные расчетные формулы в зависимости от основного направления фильтрации (главные оси фильтрации $x$ и $y$ ортогональны) имеют вид:

$$S_y = \left(Q/4\pi m\sqrt{k_y k_x}\right)\ln\left(2{,}25a_y\, t/r_y^2\right); \qquad (174)$$

$$S_x = \left(Q/4\pi m\sqrt{k_y k_x}\right)\ln\left(2{,}25a_y\, t/r_x^2\right), \qquad (175)$$

где $S_y$, $S_x$ — понижения в наблюдательных скважинах, расположенных на соответствующих лучах по главным осям фильтрации.

Определение параметров выполняется на основе применения методов временного или площадного прослеживания уровней. Строятся графики $S$—$\lg t$ или $S$—$\lg r$

$$S_x = A_x + C_x \lg t \text{ и } S_y = A_y + C_y \lg t,$$

где

$$A_x = C_x \lg\left(2{,}25a_x/r_x^2\right); \quad C_x = 0{,}183Q/m\sqrt{k_x k_y}; \qquad (176)$$

$$k = \sqrt{k_x k_y} = 0{,}183Q/mC_x; \qquad (177)$$

$$a_x = 0{,}445\left(r_x^2/t_0\right)\exp\left(2{,}3A_x/C_x\right). \qquad (178)$$

Аналогично определяются параметры и по данным луча в направлении $y$.

Отношение $k_x/k_y = a_x/a_y = \lambda^2$, отсюда при известном $k$ определяются $k_x$ и $k_y$

$$k_y = k/\lambda \text{ и } k_x = \lambda k. \qquad (179)$$

**5.32.** Глинистые грунты относятся, как правило, к слабопроницаемым. В связи с весьма низкой водоотдачей и вследствие этого низким водопритоком в скважину, определение коэффициента водопроницаемости грунтов методом откачки является проблематичным. Поэтому в качестве основного способа в этих случаях рекомендуется проведение прослеживания восстановления уровня, главным образом в рабочей скважине или в первой наблюдательной при условии достижения в последней понижения достаточных размеров ($\geqslant$0,3 м).

Обработка материалов восстановления уровня проводится с обязательным учетом емкости опытной скважины по зависимости (74). Необходимость учета указанного фактора следует из наличия на графике $S$—$\lg t/(T_0+t)$ отклонения в начальной его части от прямой. При этом следует отметить, что многие глинистые грунты, считающиеся практически водоупором (или практически непроницаемыми) при их опробовании в лабораторных условиях, являются за счет макронеоднородностей (трещины, ходы землероев и пр.) проницаемыми в массиве грунта. Если любая выработка (скважина, шурф и пр.), пройденная в таких грунтах, наполняется в течение 3—5 сут водой, то грунт должен подвергнуться фильтрационному опробованию откачкой с последующим прослеживанием восстановления уровня.

Во многих случаях при опробовании глинистых грунтов возможно применение только экспресс-методов — мгновенное понижение уровня в скважинах с последующим прослеживанием его восстановления.

Кустовые откачки в глинистых грунтах удается провести только в редких случаях.

**5.33.*** Торф является органогенным грунтом, которому свойствен-

---

* Пункт раздела составлен канд. техн. наук Е. А. Коноваловым (Калининский политехнический институт).

на значительная специфика фильтрационных свойств, что связано с их генезисом и условиями водного питания. Торф в залежи делится на три типа:

низинный (евтрофный), основной источник питания — подземные воды;

верховой (алиготрофный), основной источник питания — атмосферные осадки;

переходный (незотрофный), источник питания — смешанный. Фильтрационные свойства торфов определяются, главным образом, видом растений — образователей, плотностью и степенью их разложения. Поэтому торфяная залежь представляет из себя весьма неоднородную, часто анизотропную фильтрационную систему, обладающую повышенной деформационной чувствительностью (особенно верховой тип). При осушении торф уплотняется. По своему фильтрационному строению торфяная залежь может иметь наряду с однородным и слоистое строение с верхними более проницаемыми слоями, с часто (в залежах верхового типа) встречаемыми раздельными (пограничными) слоями хорошо разложившегося торфа, имеющими весьма низкую проницаемость (часто это практически водоупоры); изотропные слои торфа могут перемежаться с анизотропными. Поэтому обработка откачек производится главным образом на основе применения полуэмпирических и эмпирических зависимостей, полученных для необсаженных скважин. Но во многих случаях могут применяться и теоретически обоснованные зависимости, используемые для минеральных грунтов.

Метод откачек для фильтрационного опробования торфяных грунтов является основным и его целесообразно применять при относительно плотной торфяной залежи, имеющей капиллярную кайму небольшой мощности.

Результаты откачек в торфяных залежах позволяют, как правило, получить приближенные значения коэффициента фильтрации (откачки проводятся только для торфов, находящихся в талом состоянии). Определение коэффициента фильтрации состоит в быстром понижении уровня в скважинах и в последующем прослеживании восстановления уровня. Обработка результатов наблюдений ведется по формуле Г. Д. Эркина

$$k = \left[ 3{,}5 r_0^2 / (H + d_0)\, t \right] \lg (y_0\, y_t), \qquad (180)$$

где $y_0$, $y_t$ — понижения уровня в скважине от естественного в начальный и последующий моменты восстановления после откачки (рис. 33); $r_0, d_0$ — радиус, диаметр опытной скважины; $H$ — слой воды в скважине перед откачкой, отсчитывается от естественного (первоначального) уровня; $t$ — продолжительность восстановления текущего уровня $y_t$.

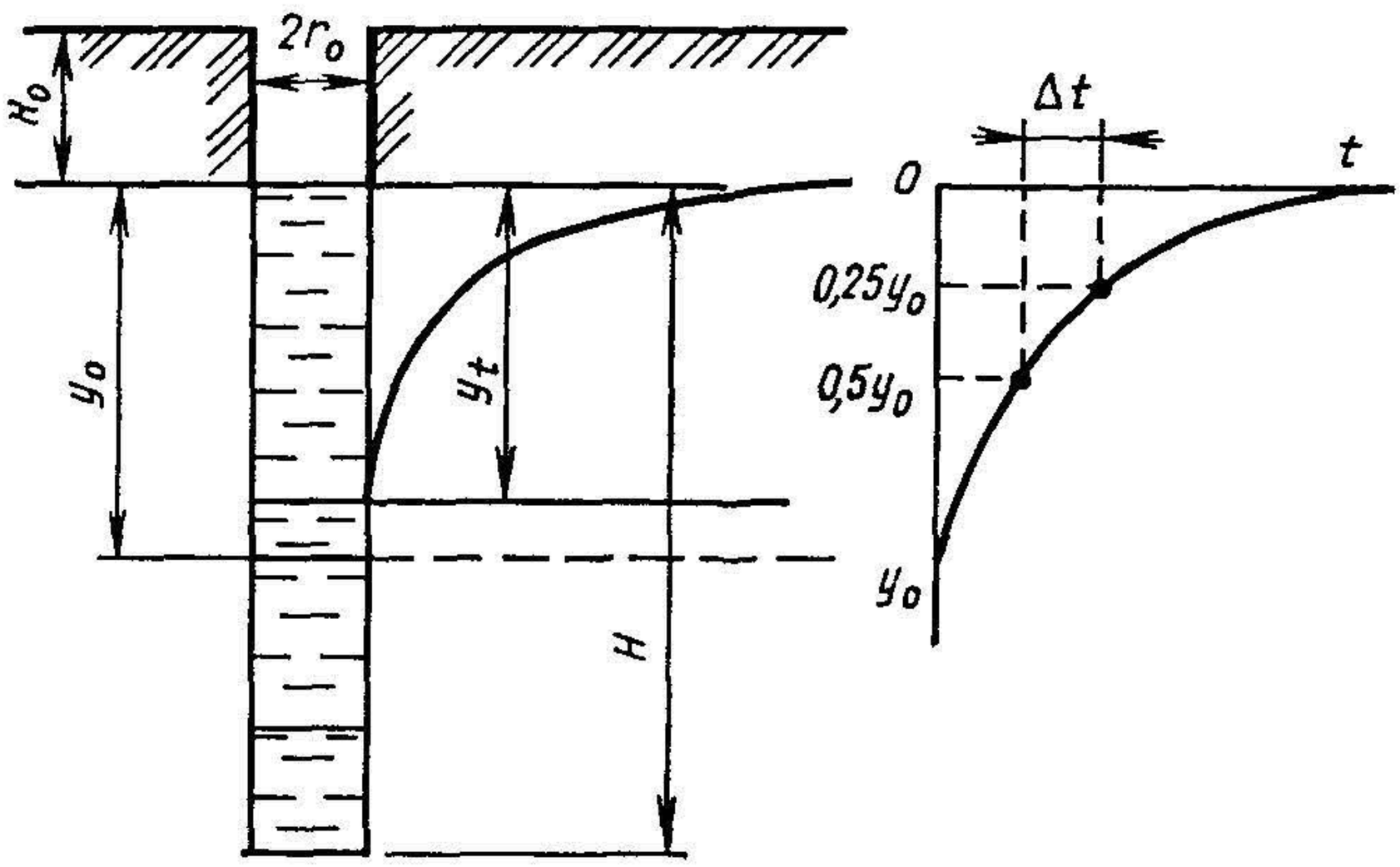



Рис. 33. Схема определения коэффициента фильтрации грунта по скорости заполнения скважины

Принимается, что определяемый таким путем $k$ характеризует весь слой торфа, расположенный между начальным положением воды и дном скважины.

На основе экспериментальных данных строится график в координатах $\lg(y_0/y_t), t$. При расчете коэффициента фильтрации при наличии переломов в графике целесообразно использовать данные опыта на завершающей стадии восстановления уровня (60—80 %), когда приток в скважину меньше зависит от нисходящей фильтрации вблизи скважины.

Для обеспечения большей сравнимости значений коэффициентов водопроницаемости, получаемых в разных опытах, рекомендуется при обработке вводить следующий унифицированный расчетный интервал уровней $y_1=0{,}5y_0$ и $y_2=0{,}25y_0$.

Формула Г. Д. Эркина в этом случае записывается в виде

$$k=\left[3{,}5r_0^2/(H+d_0)\,\Delta t\right]\lg(y_1/y_2)=1{,}05r_0^2/(H+d_0)\,\Delta t, \quad (181)$$

где $\Delta t$ — продолжительность восстановления уровня с $y_1$ до $y_2$ заданного интервала. Значение коэффициента фильтрации приводится к температуре 10 °С.

Для слоистой торфяной залежи испытания проводят по комплексу скважин, заложенных в соответствующие слои. Испытания следует проводить при относительной стабильности естественного потока грунтовых вод, т. е. не ранее чем через 2—3 сут после выпадения относительно обильных атмосферных осадков. Уровень грунтовых вод должен быть расположен ниже деятельного слоя болота, т. е ниже поверхности болота на 0,2—0,3 м.

На торфяных залежах, подстилаемых песками и имеющих питание подземными напорными водами, испытания проводят в неглубоких скважинах, не доходящих до песчаного слоя на 1—2 м.

Откачки желательно проводить в местах, где естественный уровень расположен на глубине не более высоты капиллярного поднятия воды в торфе $H_k=0{,}3—0{,}5$ м. Целесообразно принимать $y_0 \leqslant H_k$.

Площадки для откачек выбираются по возможности на однородных по строению залежей участках.

## Экспресс-методы

5.34. Эти методы основаны на данных наблюдений за напором в скважине после быстрого возмущения подземных вод, т. е. после кратковременной откачки При кратковременных откачках (мгновенных) в скважинах создается быстрое понижение напора, в течение которого пьезометрическая воронка у скважины не успевает образоваться и затем начинается восстановление начального напора (уровня или давления), по которому и определяются параметры.

Мгновенные откачки особенно целесообразно применять для слабопроницаемых грунтов, в которых пьезопроводность (уровнепроводность) мала и в период действия мгновенного импульса изменения напора (уровня или давления) за стенками скважины практически не происходит.

В период восстановления напора после мгновенного его понижения имеет место приток в скважину и накопление в ней жидкости, что следует учитывать, но в некоторых случаях приток в скважину и аккумуляция в ней воды не происходит, т. е. на стенке скважины принимается условие $Q=0$.

Мгновенное изменение напора в скважине осуществляется следующими способами:

маневрированием задвижкой на устье фонтанирующих скважин (выпусков) (при этом аккумуляции воды в скважине не происходит);

кратковременным включением насоса или компрессора, что вызывает быстрое понижение уровня в скважине, после выключения насоса (компрессора) по уровнемеру регистрируется восстановление уровня в скважине (в этом случае имеет место аккумуляция воды в скважине);

маневрированием задвижкой испытателя пласта;

желонированием скважины — наиболее распространенный в практике инженерных изысканий способ быстрого понижения воды.

Экспресс-методы дают надежные результаты при проведении опытов в основном в необсаженных скважинах, т. е. в скважинах, пройденных в относительно устойчивых породах (суглинках, глинах,

торфах и т. д.). Рассматривается случай мгновенной откачки путем желонирования скважины.

При установившемся режиме фильтрации коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$k = 0{,}5 r_0^2 R \ln u_0/u_t/mt, \tag{182}$$

где $R=\ln(r_1'/r_0)+0{,}5\zeta$ для ограниченного пласта и для полуограниченного пласта $R=2\ln(1{,}47\frac{l_0}{\zeta r_0})$; $r_1^1$ — расстояние от центральной скважины до точки, где $S=0{,}05S_0$, $r_1'=5—10$, $u_{0,t}=S_0, S_t$ — для напорного пласта и $u_{0,t}=S_0(2H—S_0)$, $S_t(2H—S_t)$ — для безнапорного пласта; $m$ — мощность ограниченного пласта и $m=l$ для полуограниченного пласта; $u_0$ — соответствует максимальному понижению напора (уровня) в скважине, т. е. в начале восстановления. При незатопленном фильтре принимается $l=l_0—0{,}5(S_0+S_t)$.

В случае, когда откачка производится в обсаженных скважинах через дно (например, в процессе бурения), определение коэффициента фильтрации производится по формуле

$$k = \alpha (r_0/t) \ln (u_0/u_t), \tag{183}$$

где $\alpha$ — коэффициент, для плоского дна $\alpha=0{,}5$, для полусферического $\alpha=0{,}25$, для промежуточного случая, наиболее близкого к практике $\alpha=0{,}375$. Формулы (182) и (183) можно записать в виде

$$\ln (u_0/u_t) = A_1 t, \ A_1 = 2mk/r_0^2 R \tag{184}$$

и

$$\ln (u_0/u_t) = A_2 t, \ A_2 = k/\alpha r_0. \tag{185}$$

Из этого следует, что все точки на графике $\ln(u_0/u_t)—t$ должны ложиться на прямую линию, проходящую через начало координат. Поэтому и обработку опытных данных следует вести на основе построения указанного графика.

По графику находится значение $A$

$$A = \operatorname{tg}\alpha = \left(\ln\frac{S_0}{S_1} - \ln\frac{S_0}{S_2}\right)\Big/ (t_1 - t_2). \tag{186}$$

При известном $A$ определяется $k$

$$k = A_1 r_0^2 R/2m; \tag{187}$$

$$k = A_2 \alpha r_0. \tag{188}$$

5.35. При неустановившемся режиме фильтрации коэффициенты фильтрации и пьезопроводности (уровнепроводности) могут быть определены для напорного упругого пласта и безнапорного (с учетом аккумуляции воды в скважине) при известной величине $\mu^*$ или $\mu$

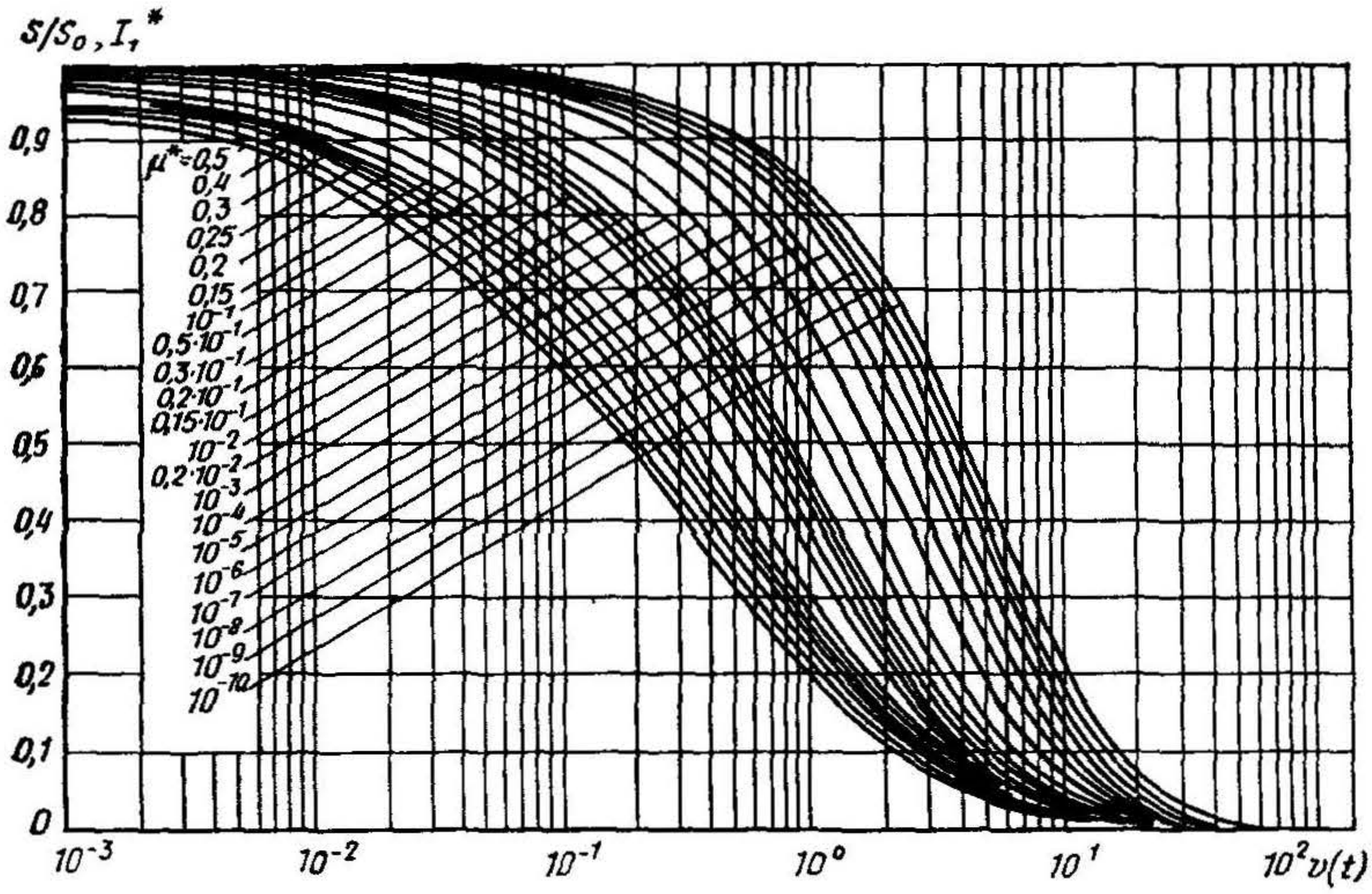



Рис. 34. График $I^*$ ($\mu,^*$ $v$)

следующим образом. Строится график $S/S_0$—$\ln t$ и по заданному значению $\mu^*$ или $\mu$, который совмещается с соответствующей кривой графика, представленного на рис. 34. При неизвестном $\mu^*$ или $\mu$ производится совмещение с кривой графика (эталонной), у которой совпадает наибольшее количество точек с опытной кривой (опытный график строится в масштабе эталонной кривой). Задаваясь значением $t^o$, определяем соответственно $k$ и $v$

$$k = vr_0^2/mt, \quad v = kmt/r_0^2. \tag{189}$$

Зная $km$ и $\mu^*$ или $\mu$, нетрудно определить

$$\alpha = r_0^2\, v/\mu t. \tag{190}$$

**5.36.** Метод применения испытателей пластов. Основной расчетной зависимостью принята приближенная формула

$$P_0 - P(t) = (Q^* \rho/4\pi km) \ln\left((t_0 + t)/t\right), \tag{191}$$

где $P_0$ и $P(t)$ — пластовое давление и давление, регистрируемое глубинным манометром под паркером; $Q^*$ — приведенный дебит, равный $Q^* = v/t_0$; $v$ — объем воды, полученный за время $t_0$, т. е. до закрытия запорного клапана; $\rho$ — плотность жидкости.

На основе результатов испытания строится кривая восстановления в координатах $p$—$\ln[(t_0+t)/t]$, затем по наклону прямолинейного участка $A = \operatorname{tg}\alpha = Q^*/4\pi km$ определяется коэффициент фильтрации

$$k = Q^*/4\pi Am. \tag{192}$$

Пластовое давление $P_0$ находится по отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат. Недостатком является осреднение дебита притока, который в общем меняется за время $t_0$. Поэтому принимается аппроксимация фактической кривой ступенчатой линией и вместо $t_0$ принимается $t^*$

$$t_0^* = 2\left[\ t_0 - (\Delta t/2v)\sum_{i=1}^{n-\frac{1}{2}}(Q_i + Q_{i+1})(\ t_i + t_{i+1})\ \right], \qquad (193)$$

при этом принимается $Q^* = v/t_0^*$, где $n$ — число точек, $\Delta t$ — интервал аппроксимации. В этом случае строится график в координатах $P$, $\ln[(t_0+t)/t]$.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Абрамов С. К., Алексеев В. С.** Забор воды из подземного источника.— М.: Колос, 1980.

2. **Алексеев В. С., Гаврилко В. М., Гребенников В. Г.** Рекомендации по восстановлению производительности скважин реагентными методами.— М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975.

3. **Антонов В. В., Мироненко В. А.** Сравнительный анализ расчетных гидрогеологических параметров, определяемых одиночными и кустовыми откачками.— Разведка и охрана недр, 1975, № 3, с. 45—49.

4. **Арцев А. И.** Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования для водоснабжения и водоотведения.— М.: Недра, 1979.— 295 с.

5. **Бабушкин В. Д., Плотников И. И., Чуйко В. М.** Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород.— М.: Недра, 1974.— 208 с.

6. **Белкин О. К.** и др. Опыт бурения гидрогеологических скважин.— М.: Недра, 1970.

7. **Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.** Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек.—М.: Недра, 1979.— 328 с.

8. **Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М.** Основы гидрогеологических расчетов.— М.: Недра, 1969.— 367 с.

9. **Веригин Н. Н.** Методы определения фильтрационных свойств горных пород.— М.: Госстройиздат, 1962.— 180 с.

10. **Временные** методические указания по разглинизации гидрогеологических скважин комбинированным способом.— М.: ВСЕГИНГЕО, 1971, 39 с.

11. **Временные** методические указания по разглинизации скважин на воду способом обратновсасывающей промывки через окна.— М.: ВСЕГИНГЕО, 1967,— 17 с.

12. **Гаврилко В. М., Алексеев В. С.** Фильтры буровых скважин.— М.: Недра, 1976.

13. **Гидрогеологические** исследования в горном деле (под ред. Мироненко В. А.).— М.: Недра, 1976.— 351 с.

14. **Веригин Н. Н. и др.** Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород.— М.: Недра, 1977.— 272 с.

15. **Изыскания** и защита от подтопления на застроенных территориях. Под ред. О. А. Смирнова.— Киев: Будівельник, 1976.— 202 с.

16. **Инструкция** по инженерным изысканиям для промышленного строительства: СН 225-79/Госстрой СССР.— М.: Стройиздат, 1977.

17. **Инструкция** по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод/ ГКЗ СССР.— М., 1976.— 74 с.

18. **Керкис Е. С.** Методы изучения фильтрационных свойств горных пород.— Л.: Недра, 1975.— 231 с.

19. **Методическое** руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям для мелиоративного строительства.— 3-й вып.— М.: ВСЕГИНГЕО, 1972.— 131 с.

20. **Методические** указания по опережающему опробованию водоносных горизонтов.— М.: ВСЕГИНГЕО, 1966.

21. **Мироненко В. А., Шестаков В. М.** Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ.— М.: Недра, 1978.— 326 с.

22. **Мироненко В. А., Шестаков В. М.** Основы гидрогеомеханики.— М.: Недра, 1974.— 295 с.

23. **Мироненко В. А., Шестаков В. М., Язвин Л. С.** О постановке опытных откачек.— Разведка и охрана недр, 1974, № 5.

24. **Мироненко В. А., Шестаков В. М.** О принципах интерпретации опытно-фильтрационных наблюдений.— «Водные ресурсы», 1978, № 3.

25. **Надарейшвили А. В.** Определение расчетных гидрогеологических параметров по данным одиночных опытных откачек и фильтрации.— Разведка и охрана недр, 1975, № 6, с. 44—46.

26. **Опытно-фильтрационные** работы (Под ред. В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова).— М.: Недра, 1974.— 204 с.

27. **Перцовский В. В.** Обоснование режима опытных откачек.— Разведка и охрана недр, 1976, № 7, с. 46—49.

28. **Проектирование** водозаборов подземных вод. Под ред. Ф. М. Бочевера.— М.: Стройиздат, 1976.— 292 с.

29. **Рекомендации** по виброреагентному восстановлению производительности скважин. — ВНИИ ВОДГЕО, 1980.

30. **Рекомендации** по применению испытателей и опробователей пластов при гидрогеологических исследованиях.— М.: ВСЕГИНГЕО, 1971.— 51 с.

31. **Руководство** по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки.— М.: Энергоиздат, 1981.— 124 с.

32. **Руководство** по проектированию сооружений для забора подземных вод.— М.: Стройиздат, 1978.— 208 с.

33. **Справочное** руководство гидрогеолога. Под ред. проф. Максимова В. М. — 3-е изд. — Л.: Недра, 1979. — т. 1—512 с., т. 2— 295 с.

34. **Хохлатов Э. М.** Расчет параметров по данным кустовых откачек вблизи несовершенных рек.— Труды института ВОДГЕО, «Научные исследования в области инж. гидрогеологии».— М., 1979, с. 84—89.

35. **Указания** по опытно-фильтрационным работам при изысканиях для мелиоративного строительства.— М.: Гипроводхоз, 1977.— 165 с.

36. **Хохлатов Э. М.** Расчет береговых водозаборов в двухслойных пластах.— Труды института ВОДГЕО, 63-й вып. М.: 1977, ВОДГЕО, с. 48—55.

37. **Шестаков В. М.** Постановка опытно-фильтрационных работ вблизи водотоков.— Разведка и охрана недр, 1977, № 9, с. 38—44.

38. **Шустов В. М.** Техника измерений при полевых гидрогеологических исследованиях.— М.: Недра, 1978.— 192 с.

## СОДЕРЖАНИЕ


Предисловие . . . . . 3

**1. Общие положения** . . . . . 4

Основные гидрогеологические параметры . . . . . 4
Виды откачек и область их применения . . . . . 5
Рекомендации по выбору технологических схем испытаний при изысканиях для строительства . . . . . 10
Достоверность определения гидрогеологических параметров методом откачек воды из скважин . . . . . 12
Схематизация природных условий . . . . . 16

**2. Условия проведения откачек** . . . . . 17

Выбор местоположения и схемы проведения испытаний . . 17
Режим и продолжительность испытаний . . . . . 38
Выбор способа бурения и конструкции скважин для проведения испытаний и технологические требования к их сооружению. 42

**3. Оборудование и приборы** . . . . . 50

Фильтры . . . . . 50
Водоподъемники . . . . . 56
Измерительные приборы . . . . . 60

**4. Проведение испытания** . . . . . 62

Подготовка к откачке . . . . . 62
Производство откачки . . . . . 66
Первичная камеральная обработка результатов испытания . 72

**5. Обработка и интерпретация результатов испытаний** . . 73

Общие положения . . . . . 73
Откачки в однородных пластах . . . . . 81
Откачки в неоднородных пластах . . . . . 111
Откачки в породах, имеющих специфические фильтрационные свойства . . . . . 126
Экспресс-методы . . . . . 135

Список литературы . . . . . 139

Нормативно-производственное издание

ПНИИИС ГОССТРОЯ СССР

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ОТКАЧКИ ВОДЫ ИЗ СКВАЖИН**

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией *Л. Г. Бальян*
Редактор *Л. Д. Дутко*
Младший редактор *М. А. Шиффер*
Технические редакторы *Н. В. Высотина, Н. Г. Алеева*
Корректор *Г. А. Кравченко*

**Н/К**

---

Сдано в набор 24.07.85. Подписано в печать 21.03.86. Т-08136. Формат 84×108 1/32. Бумага тип. № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 7,56. Усл. кр.-отт. 7,77. Уч.-изд. л. 8,57. Тираж 7000 экз. Изд. № XII-1394. Зак. № 272. Цена 45 коп.

---

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7