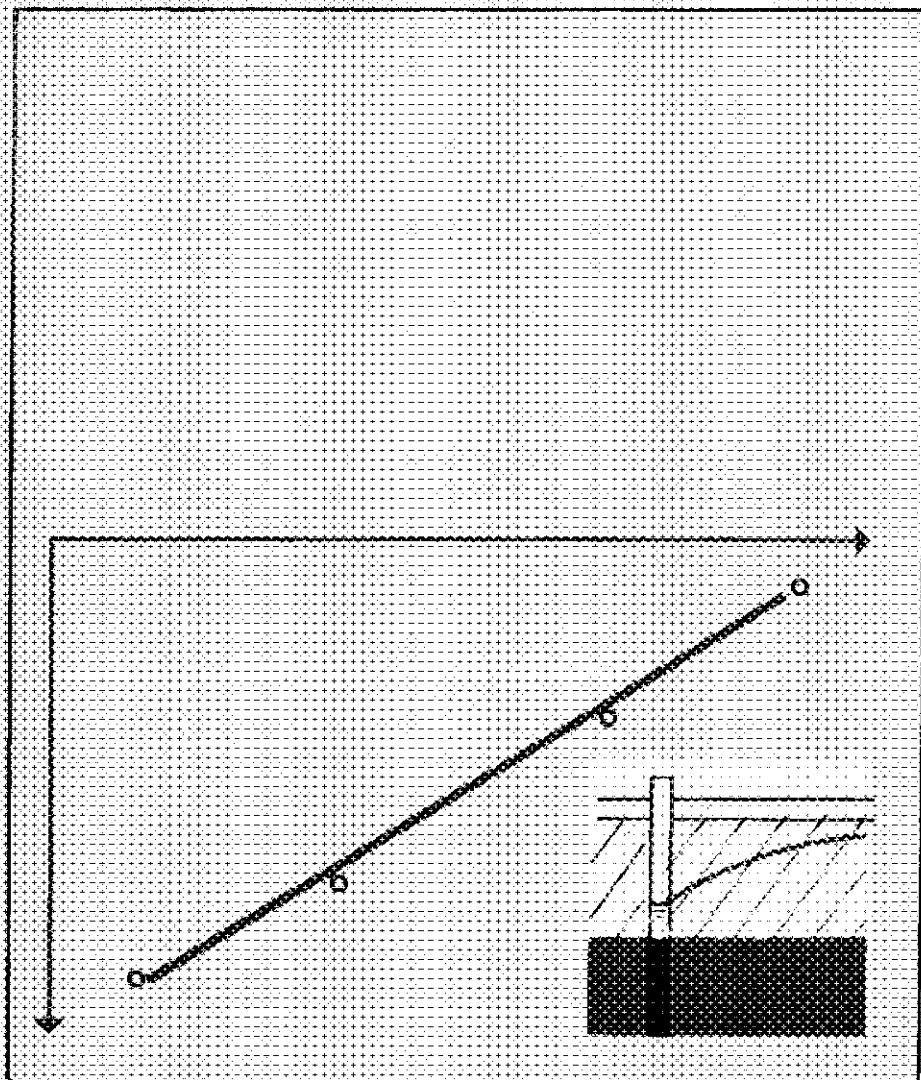


ОПЫТНО ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ



ОПЫТНО- ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Под редакцией
В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова



Издательство «Недра»
МОСКВА 1974

Опытно-фильтрационные работы. Под редакцией В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова. М., «Недра», 1974, 204 с.

Опытно-фильтрационные работы являются весьма ответственной и сравнительно дорогостоящей частью гидрогеологических работ. Этим объясняется повышенный интерес к совершенствованию методики их проведения и обработки данных.

В книге рассматриваются основные вопросы технического оснащения опытно-фильтрационных работ. Приводятся типовые схемы конструкций опытных и наблюдательных скважин, даются краткие сведения о современных типах водоподъемных средств, о приборах для замеров и регистрации изменения уровня воды в скважинах и т. д. Рассматривается методика обработки данных опытно-фильтрационных работ, построенная на современном научном уровне с использованием ряда оригинальных автогорских проработок. Оригинальная методика приводится для обработки данных откачек, располагаемых вблизи рек или водоемов, в слоистых и безнапорных пластах, для несовершенных скважин в напорных и особенно в безнапорных пластах в случае расположения скважины у свободной поверхности безнапорного потока при нестационарном режиме откачки, пересмотрена методика про- ведения и обработки опытных наливов в шурфы, заново разработана методика опытно-миграционных работ в скважинах.

Книга представит интерес для широкого круга гидрогеологов, инженеров-геологов, гидротехников, горняков, занимающихся вопросами полевых изысканий и исследований.

Таблиц 30, иллюстраций 69, список литературы — 152 названия.

Авторы: В. М. Шестаков, Д. Н. Башкатов, И. С. Пашковский, В. С. Алексеев, Ю. О. Зеегофер, А. Г. Тесля, И. Т. Гаврилов, А. А. Рошаль, В. В. Бадов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Важнейшим этапом гидрогеологических изысканий и исследований, проводимых для прогнозов режима, баланса и состава подземных вод, является обоснование фильтрационных (расчетных) схем, включающих в себя строение водоносных пластов и горизонтов, характеристики их границ, значения гидрогеологических (фильтрационных) параметров пластов с учетом закономерностей их распределения. С этой целью широко используются опытно-фильтрационные работы, представляющие полевые гидродинамические опробования, направленные на количественную характеристику параметров водоносных пластов*. Следует заметить, что опытно-фильтрационные работы относятся к наиболее сложным и дорогостоящим видам гидрогеологических исследований и потому требуют наибольшего внимания и творческого отношения.

Основными видами опытно-фильтрационных работ являются опытные откачки, широкое распространение имеют также опытные наливы и нагнетания; этим видам работ в книге уделяется наибольшее внимание.

В главе I рассмотрены технические средства, используемые для производства опытных откачек, наливов и нагнетаний. Здесь даются обоснования выбора способа бурения, конструкций центральных и наблюдательных скважин, приводятся рекомендации по подбору рациональной конструкции фильтра и расчету его основных параметров. Описаны приборы для измерения и регистрации изменения уровня воды и дебита при откачках, которые пока еще недостаточно полно внедряются в практику опытно-фильтрационных работ.

В главе II рассмотрены основные вопросы методики обработки данных опытных откачек, наливов, нагнетаний. Следует заметить, что эта методика в последнее время претерпела существенные изменения и продолжает непрерывно совершенствоваться, причем характерным признаком современных путей ее развития является

* В соответствии с этим определением к опытно-фильтрационным работам не относятся опытно-эксплуатационные откачки, проводимые из водозаборных скважин, в том случае, когда их задачей является установление эмпирических связей между дебитом скважин и понижением уровня.

широкое использование данных нестационарного режима фильтрации.

Опытные откачки могут быть одиночными и кустовыми; в последнем случае в состав опытного куста, кроме центральной скважины, в которой устанавливается насос, входят наблюдательные скважины (пьезометры). Полный комплекс фильтрационных параметров можно определять только по данным кустовых откачек. Данные одиночных откачек позволяют найти только коэффициент фильтрации (для совершенных скважин — проводимость) того слоя, в котором расположена скважина, причем с пониженнной точностью. Для интенсификации водоотбора могут проводиться групповые откачки, в этом случае насосы устанавливают в нескольких центральных скважинах.

Для ориентировочной оценки проницаемости применяются экспресс-наливы, целью которых является изучение реакции скважины на мгновенное (импульсное) ее возмущение. В гидрогеологической практике применяются как экспресс-наливы, когда фиксируется снижение уровня после импульсного подлива некоторого количества воды, так и экспресс-откачки, когда производится импульсный отбор (оттартивание) из скважины, после чего фиксируется режим восстановления уровня.

В главе III рассмотрены специальные виды опытно-фильтрационных работ, которые отличаются от откачек и нагнетаний либо своей направленностью, либо используемым оборудованием. Для этих видов техника проведения работ и методика обработки опытных данных рассматривались совместно.

Рассмотрен опережающий способ опробования испытательными снарядами с пакерирующими элементами. Этот способ позволяет без производства дорогостоящих опытных откачек получить не только качественную характеристику опробуемого водоносного горизонта, но и в первом приближении его количественную характеристику. Вместе с тем следует иметь в виду, что опыт количественной интерпретации результатов опробования водоносных горизонтов испытательными снарядами с пакерирующими элементами невелик, поэтому в этом направлении еще следует провести определенные экспериментальные исследования.

В последнее время особое внимание уделяется оценке распределения проницаемости по разрезу опробуемого водоносного комплекса применительно к изучению фильтрационного строения основания и бортов гидросооружений, водопротоков к водозаборам, шахтам, карьерам (особенно, в трещиноватых породах), изменения качества подземных вод и ряда других случаев. Большая стоимость проведения поинтервальных откачек и нагнетаний определяет необходимость использования для этой цели способов резистивиметрии и расходометрии, которые сводятся к замерам и анализу профиля расхода потока, проходящего в скважине при откачке или наливе; в этих способах, являющихся в своей основе гидродинамическими, широко используется геофизическая

аппаратура, что дает возможность называть их гидрогеофизическими.

В начале становления находится методика проведения и обработка результатов исследований, направленных на определение миграционных параметров, необходимых для анализа и прогноза процессов переноса солей и тепла в подземных водах, поэтому при изложении этой методики особое внимание обращалось на обоснование условий и параметров опытов, обеспечивающих успешное их проведение.

Среди специальных видов опытно-фильтрационных работ рассмотрены наливы в шурфы, которые широко используются для опробования неводонасыщенных пород.

В настоящей работе не рассматриваются вопросы обоснования постановки и комплексирования различных видов опытно-фильтрационных работ в гидрогеологических изысканиях и исследованиях (их состав, количество и последовательность выполнения), поскольку эти вопросы должны решаться применительно к поставленным задачам и в комплексе с другими видами гидрогеологических работ. Они должны быть освещены в работах по соответствующим направлениям гидрогеологических исследований. По этим же соображениям не рассматриваются вопросы методики обоснования выбора расчетных фильтрационных параметров и пространственного размещения опытно-фильтрационных работ.

Настоящая работа составлена следующими авторами: глава I — § 1, 3, 5 — Д. Н. Башкатовым, § 2 — В. С. Алексеевым, § 4 — Д. Н. Башкатовым и В. М. Шустовым; глава II — § 1, 2 — В. М. Шестаковым, § 3 — И. С. Пашковским, § 4, 5 — Ю. О. Зеегофером и В. М. Шестаковым, § 6 — Ю. О. Зеегофером, В. М. Шестаковым с участием Д. А. Манукьяна; глава III — § 1, 2 — В. С. Алексеевым, А. Г. Тесля, § 3 — В. С. Алексеевым, И. Т. Гавриловым, § 4 — А. А. Рошалем и В. М. Шестаковым, § 5 — В. В. Бадовым.

Общую редакцию работы осуществляли Д. Н. Башкатов (глава I и § 1, 2 главы III) и В. М. Шестаков (глава II и § 3—5 главы III).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

§ 1. ВЫБОР СПОСОБА БУРЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИН

Различные способы бурения обеспечивают получение различного объема гидрогеологической информации, поэтому выбор способа бурения должен быть обоснован, исходя из целевых задач ис следований.

Выбранный способ бурения должен обеспечивать высокие технико-экономические показатели работ. Наиболее полное решение этого вопроса достигается с помощью технико-экономических расчетов [7, 10]. Рекомендации по применению различных способов бурения приведены в табл. 1.

Подбор марки агрегата производится исходя из глубины и диаметра бурения, характера пород и др.

Из установок вращательного бурения с прямой промывкой наибольшее применение получили УРБ-ЗАМ; 1БА-15В; СБУДМ-150ЗИВ; УРБ-2; УВБ-600; ЗИФ-1200А и др. Ударно-канатное бурение осуществляется в основном двумя типами установок: УКС-22М и УКС-30М. Бурение скважин с обратной промывкой производится специально модернизированными для этих целей установками УРБ-ЗАМ; УРБ-2А; УКС-22М и УКС-30М, а также установками румынского производства ФА-12. Бурение скважин вращательным способом с продувкой осуществляется обычными установками вращательного бурения, оснащенными компрессорами типа ДК-9М; ПК-10; ЗИФ-55 и др.

Из установок комбинированного бурения некоторое распространение получили УГБХ-150Б и БУГ-100. Следует, однако, заметить, что комбинация вращательного способа с прямой и обратной промывкой, а также и ударного способа проходки может быть осуществлена на модернизированных установках типа УРБ-2А, 1БА-15В и др. Более подробные сведения о различных типах и марках буровых установок могут быть получены в работах [4, 18, 19, 30, 31].

Выбор той или иной конструкции скважины определяется рядом факторов: целевым назначением скважины, ее конечным диаметром, глубиной, гидрогеологическими установками, выбранным способом бурения и типом буровой установки.

Конструкция скважин должна обеспечивать:

1. Качественное опробование водоносных горизонтов.

Рекомендации по применению различных способов бурения

Таблица 1

Вращательный с промывкой	Вращательный с продувкой	Ударно-канатный	Комбинированный	Вращательный с обратной промывкой
<p>При бурении в хорошо изученных геолого-гидрогеологических условиях, при отсутствии в разрезе часто переслаивающихся водоносных горизонтов и в случае каптажа высоконапорных водоносных горизонтов</p> <p>При обязательном применении пластоиспытателей для опробования водоносных горизонтов в процессе бурения и геофизического комплекса исследований в процессе и после окончания проходки скважин</p> <p>При возможном применении способов устройства скважины или посадки фильтров без глинизации пластов (бурение с чистой водой в устойчивых породах, посадки фильтров ударным способом, гидроподмывом и эрлифтной прокачкой, бурение на естественных растворах и др.) либо с уменьшенной степенью глинизации пласта (бурение с аэрированными растворами)</p> <p>При бурении скважин глубиной более 100—150 м в условиях хорошей обеспеченности водой и качественной глиной</p>	<p>При бурении в безводных районах; в разрезах с многолетнемерзлыми породами до глубин 200—300 м*</p> <p>При бурении на водоносные горизонты с дебитами до 2 л/сек</p> <p>При бурении в устойчивых породах и отсутствии в разрезе часто переслаивающихся водоносных горизонтов с большими водопритоками</p>	<p>При бурении в плохо изученных геолого-гидрогеологических условиях, в случае каптажа слабонапорных водоносных горизонтов и при переслаивающихся водоносных горизонтах</p>	<p>При бурении в плохо изученных геолого-гидрогеологических условиях, частом переслаивании водоносных горизонтов, а также в случае каптажа слабонапорных водоносных горизонтов</p>	<p>При бурении эксплуатационных и дренажных скважин в рыхлых породах. При наличии большого количества воды для бурения</p> <p>При залегании уровня подземных вод глубже 2,5—3,0 м</p> <p>При бурении в летнее время и при положительных температурах</p> <p>При необходимости создания мощного контура гравийной обсыпки</p>

* Для существующего парка передвижных компрессоров типа ДК-9, ЗИФ-55 и др.

- Устойчивую работу скважины на весь период опытных работ.
- Минимальную металлоемкость и минимальный диаметр ствола скважины.
- Возможность простой технологии строительства скважины и ее минимальную стоимость.

- Простоту ликвидации скважины и возможность повторного использования обсадных труб и фильтров (для центральных и наблюдательных скважин).

При бурении скважин конечный диаметр должен обеспечить, с одной стороны, получение необходимого дебита скважины и ее длительную эксплуатацию, а с другой — производство необходимых гидрогеологических наблюдений и исследований [8, 10].

В табл. 2 даны минимальные конечные диаметры бурения скважин различного целевого назначения, исходя из условий производства необходимого комплекса гидрогеологических исследований.

Таблица 2
Минимальные конечные диаметры скважин при бурении на воду

Тип скважин	Минимальное проходное сечение, мм	Диаметр бурового наконечника при вращательном способе бурения, мм			Диаметр бурового наконечника при ударном бурении, мм	
		Призабойная зона скважины не обсаживается трубами	Призабойная зона скважины обсаживается трубами без цементации	Призабойная зона скважины обсаживается трубами с цементацией	Призабойная зона скважины не обсаживается трубами	Призабойная зона скважины обсаживается трубами
Разведочные	80—90	91	91	161—190	80—90	110
Разведочно-эксплуатационные	80—100	91	110	190	110	130
Эксплуатационные	80—100	91	110	190	110	130
Наблюдательные:						
а) при установке автоматических приборов	75—80	75	91—110	161—190	75—91	91
б) без установки автоматических приборов	40—50	45,5	75—91	151	24,5—58,5	75

Примечание. Все размеры буровых наконечников для колонкового бурения указаны применительно к размерам короночного кольца.

Начальный диаметр бурения определяется с учетом необходимости спуска промежуточных обсадных колонн, способа изоляции водоносных горизонтов и возможности размещения насоса требуемой производительности в верхнем интервале ствола.

Конструкция скважин ударного бурения характеризуется сравнительно большим числом обсадных колонн: от 2—3 до 5—6. Это связано с необходимостью закрепления пройденного бурением интервала в среднем через 30—40 м [18, 19].

Изоляция водоносных горизонтов производится с помощью спуска обсадных колонн и задавливания их башмака в глинистые породы. Применяется также способ тампонажа нижней части обсадной колонны с помощью глиняных шариков. В последние годы в ПНИИИСе, Промбурводе, Казахском гидрогеологическом управлении и в других организациях успешно разработаны и внедрены в практику новые технологические схемы ударно-канатного бурения. Для обеспечения большого выхода обсадных колонн и их извлечения применяют вибраторы и вибромолоты с центральным проходным отверстием типа С-835 и ВО-10, способ ударного бурения с доливом воды в открытый ствол скважины и в затрубный зазор, а также бурение с уширенным башмаком. Все это позволяет значительно увеличить выходы обсадных колонн и, следовательно, повысить производительность бурения и снизить металлоемкость скважин.

В последние годы для вращательного способа проходки наблюдается тенденция применения упрощенных конструкций скважин (кондуктор и эксплуатационная колонна). Это достигается совершенством технологией бурения. В таком случае конечный диаметр бурения является по существу и начальным его диаметром, так как бурение под направление (кондуктор) осуществляется на небольшую глубину (до 30—50 м) и не лимитирует мощность привода вращателя (ротора) станка и грузоподъемность его лебедки.

Все конструкции скважин можно подразделить в зависимости от способа оборудования водоприемной части. Для пород, устойчивых против обрушения, водоприемная часть скважины фильтром не оборудуется. Как правило, скважина крепится двумя-тремя колоннами обсадных труб. Причем первая колонна является направлением (кондуктором) и служит для крепления верхних интервалов ствола скважины и устья.

Для изоляции вышележащих водоносных горизонтов производится затрубная цементация, а при благоприятных гидрогеологических условиях — подбашмачная цементация. Цементация обсадных колонн требует, чтобы диаметр бурения был больше диаметра обсадных труб в среднем на 50—120 мм. Если требуется установка высокопроизводительного насоса, то верхний интервал ствола бурится и обсаживается обсадной колонной соответствующего размера. В случае капитажа высоконапорных и самоизливающихся водоносных горизонтов их герметизация обеспечивается цементацией обсадных колонн до устья. При этом применяется цемент высокого качества.

При опробовании водоносных горизонтов, представленных неустойчивыми трещиноватыми и гравелистыми породами, их крепление производится фильтрами дырчатого и щелестого типов. Если фильтр смонтирован на эксплуатационной колонне, то изоляция вышележащих водоносных горизонтов осуществляется с помощью затрубной цементации через манжеты. Замена фильтра в случае выхода его из строя исключается.

Более совершенной является конструкция скважины с установкой фильтра «вплотай». При больших глубинах бурения в ряде случаев затрубная цементация до устья может быть заменена подбашмачной. Это следует делать лишь в тех случаях, когда исключена гидравлическая связь водоносных горизонтов (потери напоров и загрязнение подземных вод).

При производстве манжетной цементации на какой-либо интервал, но не до устья скважины следует иметь в виду, что затраты средств и времени мало отличаются от соответствующих затрат при затрубной цементации обсадных колонн до устья, в то время как хорошее качество цементажа при этом гарантировать трудно.

Манжетная цементация должна производиться после работ по разглинизации, в противном случае фильтр и сам водоносный пласт будут длительное время находиться в контакте с глинистым раствором и это усложнит работы по разглинизации.

Применение подбашмачной цементации обусловливает наличие в конструкции скважины участка обсадной колонны, которая непосредственно контактирует с породой. Если скважина после проведения опытных работ будет передаваться в эксплуатацию (сельскохозяйственное или промышленное водоснабжение) и подземные воды агрессивны к металлу, то применять такую конструкцию нельзя из-за возможности коррозии и преждевременного выхода обсадной колонны из строя.

В ряде случаев (большая глубина скважин, частое переслаивание пород разной твердости, агрессивность подземных вод) могут применяться обсадные колонны (в том числе и хвостовики) с затрубной цементацией с последующим прострелом перфораторами или вскрытием гидропескоструйным способом.

Разглинизация водоносных горизонтов и фильтров наиболее эффективно производится комбинированным способом ВСЕГИН-ГЕО [9]. При относительно небольших фильтрах (до 5—8 м) последние можно вводить в пласт размывом чистой водой — расходкой [5]. Хорошие результаты обеспечиваются при способе вскрытия пласта с использованием чистой воды при избыточном давлении и с последующим оборудованием скважины фильтром.

Если бурение ведется в рыхлых породах и необходимо опробовать все встреченные водоносные горизонты, то существующие способы опробования требуют обсадки скважины трубами, установки фильтра, его разглинизации и последующей откачки. Такая схема опробования требует смены диаметра бурения, что приводит к тому обстоятельству, что практически более двух-трех опробований в одной скважине провести нельзя. Известны случаи (Костромская ГЭС и др.), когда для таких исследований приходится закладывать не одну, а две скважины: одна скважина опробует два верхних водоносных горизонта, другая — два нижних.

Большой интерес представляет предложенная В. И. Блажковым [5] схема раздельного опробования водоносных горизонтов, которые каптируются одной колонной. Изоляция фильтров друг от

друга достигается установкой цементных пробок (мостов) и специальной водоподъемной колонной с эластичным сальником. Опробование водоносных горизонтов производится раздельно сверху — вниз. После извлечения водоподъемных труб может быть произведено суммарное опробование всех водоносных горизонтов [14].

Следует особо отметить, что данная конструкция скважины не требует производства затрубной цементации.

Разгленизация при этом способе опробования производится либо комбинированным способом, либо обратновсасывающей промывкой через окна в нижней части фильтра, что обеспечивает получение дебитов, близких к дебитам скважин ударного бурения. Указанная конструкция скважины позволяет без потери диаметра произвести опробование до 5 водоносных горизонтов в одном стволе скважины, обеспечивает высокую производительность и качество опробования, малую металлоемкость конструкции скважины и отсутствие необходимости затрубной цементации. Наконец, при этой конструкции бурение ствола скважины ведется одним диаметром.

Описанная конструкция скважин прошла длительную производственную проверку в условиях Краснодарского края и других областей страны, где бурение разведочных гидрогеологических скважин ведется в рыхлых отложениях.

Если опробованию подлежат два водоносных горизонта, представленных рыхлыми песками и трещиноватыми известняками, то предусматривается конструкция скважины с двумя фильтрами.

Разгленизация водоносных горизонтов и их опробование производятся раздельно. Изоляция фильтров друг от друга достигается установкой цементной пробки внутри колонны.

В рыхлых породах при устойчивой кровле успешно могут быть применены бесфильтровые скважины [13].

Изоляция испытуемого водоносного горизонта от вышележащих водоносных горизонтов и поверхностных вод достигается обычно с помощью одной, реже двух обсадных колонн. Тампонаж чаще всего производится с помощью задавливания башмака в глинистые породы или с помощью подбашмачной цементации. С поверхности земли на глубину около 0,5 м делается цементный или глинистый замок. Верхняя часть фильтровой колонны оборудуется охранным эголовком.

Если в разрезе имеется несколько водоносных горизонтов, то над фильтром рекомендуется устанавливать эластичный тампон (по типу конструкции скважины, изображенной на рис. 1, либо опускать промежуточную обсадную колонну).

Установку фильтра в наблюдательные скважины рекомендуется производить без применения глинистой промывки. Если применяется глинистая промывка, то необходима тщательная разгленизация.

В настоящее время неглубокие пьезометрические скважины (до 50 м) бурятся в основном установками комбинированного и шнекового типов.

При использовании станков комбинированного бурения типа УГБ до водоносного горизонта применяют обычно шнековый способ проходки; оборудование же скважины фильтром производится по технологии ударного способа или путем задавливания фильтра [5].

При глубинах залегания водоносного горизонта до 10—15 м можно оборудовать скважину без ее предварительной проходки, используя забивные пьезометры (фильтры).

В последние годы в практику гидрогеологических исследований успешно внедряются антикоррозионные трубы из полиэтилена, пропилена и др. [26]. Наиболее перспективным является их применение в качестве каркасов фильтров, а также в качестве фильтровых труб в наблюдательных скважинах. Если опытные работы проводятся в районах с распространенным агрессивных подземных вод и скважина после их завершения будет передана в эксплуатацию, то эти трубы могут быть использованы и для крепления центральных скважин. Следует отметить, что в этом случае необходима затрубная цементация. Наиболее перспективный способ соединения труб сваркой, глубина крепления до 300 м.

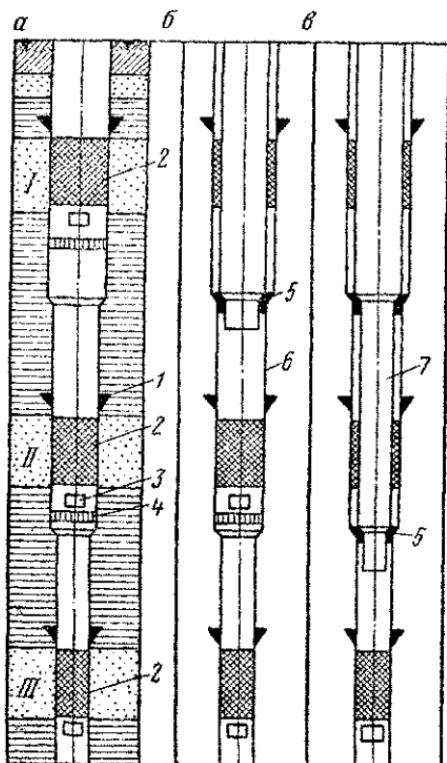


Рис. 1. Одноколонная конструкция скважины вращательного бурения с тремя фильтрами.

а — опробование первого (I) водоносного горизонта; б — опробование второго (II) водоносного горизонта; в — опробование третьего (III) водоносного горизонта.

1 — эластичный сальник; 2 — фильтр; 3 — промывочное окно; 4 — цементная пробка; 5 — сальник пеньковый; 6 — обсадная колонна; 7 — вспомогательная колонна труб

§ 2. ФИЛЬТРЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

При выборе фильтров эксплуатационных скважин наряду с обеспечением незначительных сопротивлений в начальный период эксплуатации должно выполняться условие сохранения устойчивой их работы во времени при развитии процессов химического и механического кольматажа, а также в связи с коррозией водоприемной части скважин. Этим требованиям соответствуют указания

по применению фильтров, приведенные в СН-325—65. Согласно этим требованиям в породах различного гранулометрического состава целесообразно устанавливать металлические фильтры на основе трубчатых или стержневых каркасов с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки, стального штампованного листа или сеток различного плетения. При необходимости устройства скважин в мелкозернистых и тонкозернистых песках наилучшие гидравлические характеристики имеют фильтры с рыхлой гравийной обсыпкой со стержневым или трубчатым каркасом. Трубчатые и стержневые фильтры с проволочным, сетчатым покрытием и водоприемной поверхностью из штампованного листа выпускаются Дрогобычским экспериментальным заводом специального оборудования и газовой аппаратуры Министерства газовой промышленности СССР.

На глубинах до 50 м возможно применение фильтров на основе трубчатых каркасов из твердого поливинилхлорида с круглой или щелевой перфорацией. До глубины 150 м опробована установка фильтров на основе полиэтиленовых труб. Блочные фильтры могут применяться при небольшой проектной производительности скважин (как правило, до 5 л/сек). Не рекомендуется установка этих фильтров в скважинах, пробуренных с применением глинистого раствора и в глинистых песках. Кроме трубчатых и стержневых каркасов при оборудовании опытных скважин могут использоватьсь каркасы из штампованной листовой стали с толщиной стенки 4—7 мм.

Следует отметить, что при удовлетворении конструкции скважины требованиям СН-325—65 обеспечиваются необходимые прочностные характеристики фильтров и рациональное сочетание вида водоприемной поверхности и типа опорного каркаса.

Однако при гидрогеологических исследованиях наряду с обеспечением механической устойчивости и устранением длительных суффозионных явлений в призабойных зонах скважин необходимо соблюдение гидравлических требований, сводящихся к наименьшему искажению фильтрационного потока вблизи скважины и получению максимально возможных дебитов скважин для характеристики в ходе откачки большей зоны пласта.

При изменении проницаемости призабойной зоны в процессе бурения и освоения скважины в максимальной степени сказывается ее уменьшение. При увеличении проницаемости призабойной зоны гидравлические потери в ней несущественны и соответственно незначительно влияют на рассчитываемые параметры пласта по одиночным скважинам.

При выборе конструкции фильтра необходимо учитывать, что наименьшие гидравлические потери наблюдаются при использовании фильтров каркасно-стержневого типа с гравийной обсыпкой. Данные о проницаемости фильтров различных конструкций в зависимости от скважности, полученные экспериментально Клотцем [34], приведены на рис. 2.

Проницаемость фильтра определялась на основе изучения характера деформации потока грунтовых вод при оценке его скорости радиониндикаторным методом (по скорости разбавления индикатора). Известно, что количественно степень нарушения фильтрационного потока скважины оценивается коэффициентом α , входящим в формулу для расчета естественной скорости потока подземных вод

$$v_\phi = - \frac{\pi (r_1^2 - r_0^2)}{2\alpha r_1 t} \ln \frac{c}{c_0}, \quad (2.1)$$

где r_1 — внутренний радиус фильтра; r_0 — радиус детектора; c — концентрация индикатора во время t ; c_0 — концентрация индика-

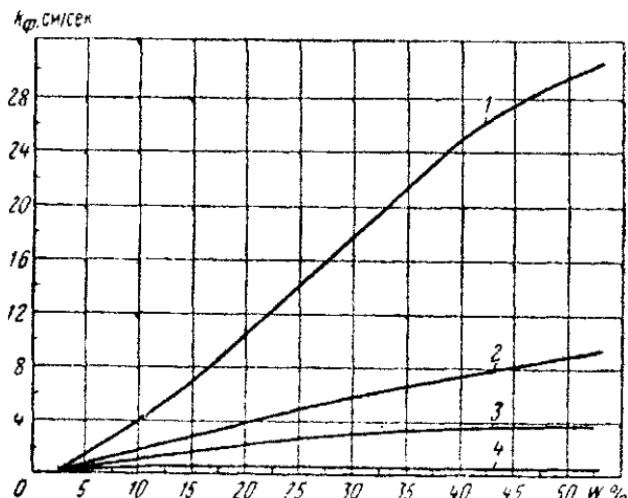


Рис. 2. Графики зависимости проницаемости фильтров различного типа от скважности (по Клотцу).

1 — для каркасно-проволочных фильтров; 2 — для фильтров с мостообразными отверстиями; 3 — для щелевых фильтров; 4 — для сетчатых фильтров

тора в начале измерений при $t = 0$; α — показатель, характеризующий степень нарушения фильтрационного потока поверхностью фильтра.

Если буровая скважина каптирует однородный водоносный пласт, то как показано С. А. Колем [25] $\alpha = 2$. Если же в однородном водоносном пласте с проницаемостью k_2 установлен фильтр с заданной проницаемостью k_1 без гравийной обсыпки, то согласно решению Н. А. Огильви [23] величину α можно выразить формулой

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]}, \quad (2.4)$$

где r_2 — наружный радиус фильтра.

Величина a определялась на основе радиоиндикаторных исследований и последующего расчета проницаемости фильтра k_2 при известной проницаемости гравийной обсыпки и водоносных пород. При этом теоретически фильтр рассматривался как пористая среда, в которой действителен закон Дарси. Согласно указанным исследованиям во всех случаях в центральных скважинах опытных кустов и в разведочно-эксплуатационных скважинах предпочтительнее применение фильтров со скважностью более 15%. При этом дополнительные потери напора, обусловленные фильтром, оказываются небольшими и их можно не учитывать при фильтрационных расчетах. Проектирование опытных скважин с увеличенной (в сравнении с пластовой) проницаемостью призабойной зоны и с фильтрами высокой скважности, кроме того, позволяет избежать наложения нестационарного изменения сопротивления скважины, обусловленного химическим кольматажем, на изменение уровней в центральной скважине или в группе опытных скважин при длительной откачке. Известно [1; 20], что сопротивление, обусловленное химическим кольматажем, изменяется по закону, близкому к экспоненциальному, но с некоторым периодом запаздывания, который в случае высокопроницаемых фильтров при заборе железосодержащих вод находится в пределах 1,5—2 лет.

При применении в скважинах, предназначенных для проведения опытно-эксплуатационных откачек, фильтров блочного типа, а также сетчатых конструкций, имеющих значительные входные сопротивления, неустановившийся характер изменения понижения уровня определяется не только нестационарностью процесса фильтрации, но и кольматажем фильтров. Для фильтров, имеющих сниженную по сравнению с пластом проницаемость, изменение удельных дебитов подчиняется экспоненциальной зависимости

$$q_t = q_0 e^{-\beta t}, \quad (2.3)$$

где q_t — текущий удельный дебит, л/сек; q_0 — начальный удельный дебит скважин, л/сек; β — коэффициент, учитывающий изменение дебита скважины в связи с кольматажем; t — время в месяцах.

Учитывая, что параметр β для блочных и сетчатых конструкций колеблется в пределах 0,05—0,15 даже в благоприятных условиях работы скважин с небольшим расходом при режиме самозазлива, оценим возможные погрешности в определении удельного дебита скважин в различные периоды времени. В табл. 3 приведены данные об изменении текущего удельного дебита скважин при $q_0 = 1$ л/сек в течение 6 месяцев откачки.

Таблица 3
Данные об изменении текущего удельного дебита скважины (в л/сек) в процессе кольматации

Время с нача- ла откачки, в месяцах	При изменении дебита	
	$\beta = 0,05$	$\beta = 0,10$
1	0,95	0,90
2	0,90	0,82
3	0,86	0,74
4	0,82	0,67
5	0,78	0,61
6	0,74	0,55

Ориентировочные расчеты показывают, что при применении фильтров с высокими начальными сопротивлениями при откачке с постоянным расходом практически очень трудно добиться стабилизации уровня в центральной скважине и ни в коей мере нельзя относить нестационарность в изменении понижения уровня за счет закономерностей фильтрации в недеформируемой водоносной среде.

Наиболее предпочтительно в опытных скважинах устраивать гравийные фильтры. Оборудование скважин такими фильтрами особенно упрощается при использовании роторного бурения с обратной промывкой забоя чистой водой, обеспечивающего проходку скважин большого диаметра. При подборе обсыпок следует придерживаться соблюдения коэффициентов межслойности $\frac{D_{50}}{d_{50}} = 10 \div 15$ (здесь D_{50} и d_{50} — размеры частиц гравийной обсыпки и песков, соответствующие 50%-ному содержанию их в пробе). В этих условиях практически всегда обеспечивается суффозионная устойчивость пород в прифильтровой зоне скважины.

Следует, однако, учитывать, что при сооружении гравийно-засыпных фильтров во всех случаях происходит расслоение гравия. Наблюдаемая дифференциация гравия в скважине с преобладанием крупнозернистых фракций в нижней части скважины может также сыграть роль при оценке параметров пластов, особенно при зональном опробовании скважин. Эффекта расслоения можно избежать, увеличивая интенсивность производства засыпки при равномерной непрерывной подаче гравия в ствол скважины в условиях открытых надфильтровых труб для обеспечения возможности самоизлива скважин при проведении засыпки.

Размеры отверстий фильтров в зависимости от состава гравийных обсыпок и естественных пород достаточно надежно можно подобрать, используя данные табл. 4.

Таблица 4
Рекомендуемые размеры отверстий фильтров в зависимости от состава гравийных обсыпок

Наименование фильтров	Размеры проходных отверстий	
	при коэффициенте неоднородности k_n менее 2	при коэффициенте неоднородности $k_n > 2$
С круглой перфорацией	2,5—3 D_{50}	3—4 D_{50}
Со щелями	1,25—2,5 D_{50}	1,5—2 D_{50}
Сетчатый	1,5—2 D_{50}	2—2,5 D_{50}

Нижние пределы значений размеров отверстий для щелевых фильтров следует принимать со щелями, ориентированными в горизонтальной плоскости.

При выборе диаметра фильтров, как правило, основываются на конструктивных соображениях, исходя из габаритов насосного оборудования, способного обеспечить требуемый водоотбор, а также из возможностей бурового оборудования. При определении длины фильтра до настоящего времени при проведении опытных работ существует тенденция к устройству совершенных по степени вскрытия пласта скважин. Однако в большинстве случаев, даже в пластах незначительной мощности, это не имеет смысла. Альбертсоном, Петерсоном и Ровером [35] аналитически и экспериментально было показано, что при $\frac{CL}{D} > 6$ гидравлические потери на скважине и, следовательно, приток к ней остаются постоянными ($C = 11,31 \mu \eta$; μ — коэффициент расхода; η — скважность фильтра; L — длина фильтра, D — диаметр фильтра). Солимэном [37] экспериментально установлено, что до 80% суммарного расхода скважины приходится на 30—40% длины фильтра. Многочисленные опытные данные по расходометрии скважин в однородных пластах также свидетельствуют о существенной неравномерности нагрузки фильтров скважин.

При выборе длины фильтра можно воспользоваться приемом, основанном на том факте, что показатель сопротивления скважин, обусловленный несовершенством по степени вскрытия пласта, уменьшается с увеличением длины фильтра и при $l/m = 0,8—0,9$ становится незначительным. Суммарное же сопротивление фильтра прямо пропорционально его длине. Это можно объяснить, если представить, что однородный водоносный пласт оборудован фильтром лишь частично, а некоторая зона ствола скважины сохраняет устойчивость без крепления ее фильтром. Очевидно, что дополнительное сопротивление будет сказываться только на участке установки фильтров.

В результате получим, что суммарное сопротивление, связанное с конструктивными особенностями скважины, имеет оптимальную величину, поскольку сопротивление, обусловленное несовершенством по степени вскрытия пласта, уменьшается с увеличением длины фильтра, а потери напора из-за несовершенства скважин по характеру вскрытия пласта увеличиваются при большей длине фильтра. По этой причине увеличение длины фильтра гидродинамически несовершенной скважины не приводит к приросту ее расхода при заданном понижении уровня. В максимальной степени это справедливо при использовании в скважине фильтров с большими сопротивлениями (сетчатого, блочного, фильтров-каркасов с малой скважностью). Для иллюстрации применения этого метода подбора длины сетчатого фильтра воспользуемся результатами исследований сопротивлений сетчатых фильтров на каркасе из перфорированной трубы с сеткой галунного плетения № 12/90. Графики изменения сопротивлений $\zeta_{2\phi}$ сетчатого фильтра в зависимости от числа отверстий n на каркасе диаметром D приведены на рис. 3.

Пример расчета. Необходимо выбрать длину фильтра скважины с водоприемной поверхностью из сетки галунного плетения № 12/90 на каркасе из трубы с круглыми отверстиями. Мощность напорного водоносного горизонта 10 м, диаметр фильтра при предполагаемой откачке эрлифтом принимается равным 100 мм. При подборе длины фильтра удобно производить построение совмещенных графиков зависимости ζ_1 и $\zeta_{2\phi}$ от l/m . В рассматриваемом примере при диаметре перфорации $a_0=20$ мм и $a=\frac{d_0}{D}=0,2$ сопротивления сегчатого фильтра при скважности 24, 10 и 5% и значениях параметра 0,01 nD равны соответственно 24, 10 и 5. Из графиков, представленных на рис. 4, следует, что в каждом случае применение фильтра длиной, большей той, при которой оба показателя сопротивления равны друг

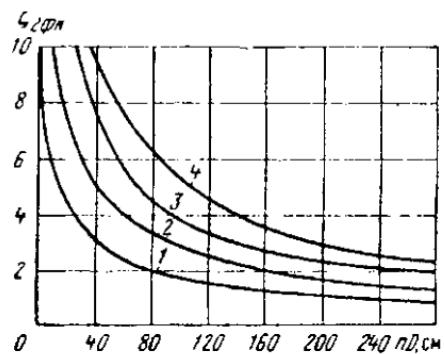


Рис. 3. График зависимости $\zeta_{1\phi}$ от параметра $\beta = nD$.

1 — $a = 0,27$; 2 — $a = 0,20$; 3 — $a = 0,13$
4 — $a = 0,05$

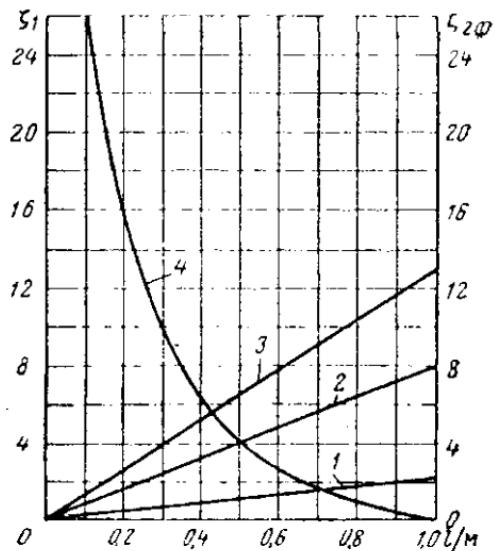


Рис. 4. График подбора конструкции водоприемной части скважины.

1 — для скважности, равной 24%; 2 — то же, 10%; 3 — то же, 5%; 4 — изменение ζ , от l/m

другу ($\zeta_1 = \zeta_{2\phi}$), не может привести к снижению потерь, связанных с конструктивными особенностями скважин. Для сегчатых фильтров со скважностью опорного каркаса 24, 10 и 5% оптимальные значения l/m составляют соответственно 0,7; 0,5; 0,43.

Очевидно, что в большинстве случаев даже при применении фильтров с малыми входными сопротивлениями отношение l/m может приниматься равным 0,7—0,8.

Изложенные рекомендации по устройству и подбору фильтров позволяют в общем случае производить обоснованное проектирование опытных скважин. При этом в ходе откачки обеспечиваются достаточно большие понижения уровней в наблюдательных скважинах и, следовательно, повышается точность гидрогеологических исследований. Но несмотря на обеспечение минимальных гидравлических потерь на фильтрах скважин оценивать параметры пластов по центральной скважине обычно нецелесообразно. Это связано с нерегулируемыми и трудно поддающимися учету деформациями пород в призабойной зоне скважины в процессе ее бурения и освоения. Обследование вновь пробуренных и находившихся в эксплуа-

тации скважин показывает, что, как правило, при каптаже водоносных горизонтов в рыхлых отложениях скважины имеют положительные значения обобщенных сопротивлений, что свидетельствует об относительно меньшей проницаемости призабойной зоны и фильтра по сравнению с проницаемостью пласта.

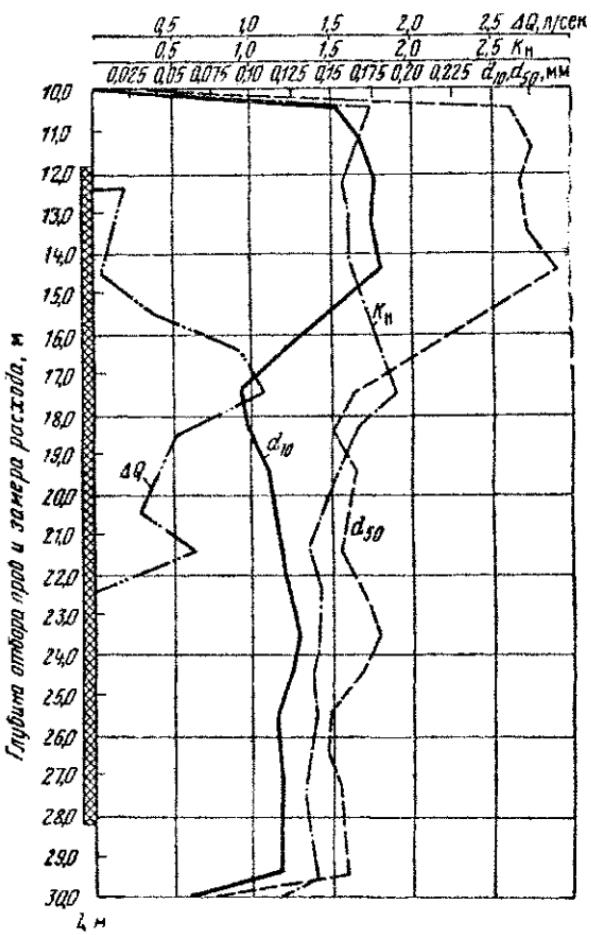


Рис. 5. Графики изменения состава водоносных пород и расходометрии скв. 44 водозабора «Балтвзерс» г. Риги

В случае же проведения резистивиметрии или расходометрии указанные рекомендации позволяют в максимальной степени избежать погрешностей в результатах опробования. Применение фильтров блочного типа в скважинах, предназначенных для этих исследований, недопустимо вследствие неравномерности колыматажа блоков. На рис. 5 приведена типичная дифференциальная расходограмма скважины, оборудованной пористокерамическим фильтром

в однородном пласте. Очевидно, что в этом случае в равной степени, как и при бурении скважин ударным способом со значительной подработкой забоя или роторным способом с глинистой промывкой вне зависимости от способа разглинизации, кривая расходометрии характеризует качество бурения и освоения скважин, но не фильтрационные свойства пород, вскрываемых в разрезе. Кроме того, при обработке данных расходометрии необходимо учитывать неравномерность нагрузки фильтров, обусловленную их гидравлическими особенностями. Подробнее этот вопрос рассматривается в разделе, посвященном методике обработки данных расходометрии опытных скважин.

Конструкции фильтров наблюдательных скважин подбираются аналогично фильтрам опытных скважин, однако в этом случае

Основные параметры эрлифтов

Условия работы эрлифта	Отношение глубины погружения динамического уро						
	1 : 2,5				1 : 2		
	Динамический уровень (от						
	10	20	30	40	50	20	30
Глубина погружения в м от уровня излива воды:							
смесителя	25	50	75	100	125	40	60
водоподъемной трубы . . .	28	53	79	103	128	43	63
Минимальная глубина скважины, м	33	58	84	110	135	48	68
Рабочее давление воздуха в воздухопроводной трубе у смесителя, атм	1,5	3	4,5	6	7,5	2	3
Удельный расход воздуха, м ³ на 1 м ³ воды	3	3,8	4,66	5,41	6,15	5,43	6,46
Расход воздуха в м ³ /мин (в числителе) и энергии в квт (в знаменателе), необходимый для подачи воды, м ³ /ч	0,25	0,32	0,38	0,42	0,5	0,43	0,53
5	0,92	1,3	2,1	2,83	3,86	1,5	2,5
	0,5	0,63	0,75	0,84	1	0,86	1,1
10	1,84	2,8	4,25	5,6	7,73	3	5
	1	1,26	1,5	1,7	2	1,72	2,12
20	3,68	5,6	8,5	11,2	15,45	6	10
	1,5	1,9	2,3	2,52	3	2,6	3,2
30	5,4	8,2	12,73	17	23,2	9	15
	2,5	3,15	3,75	4,2	5	4,3	5,3
50	9	14	21,5	28,5	38,65	15	25
	5	6,3	7,5	8,4	10	8,6	10,6
100	18	28	43	57	77	30	50

может допускаться применение фильтров с несколько повышенными сопротивлениями. Поскольку наблюдательные скважины используются не только для изучения пьезометрического уровня водоносного горизонта, но и для изучения химического состава подземных вод, при оборудовании этих скважин более целесообразно использовать фильтры и трубы из полимерных материалов: винилпластика, полиэтилена, стеклопластика. Скважность каркасов фильтров может не превышать 10%, в качестве водоприемной поверхности могут быть использованы стеклоткани с армирующей подкладкой из горированной винилластовой сетки с размером отверстий 2,8 мм или фильтровальные сетки из пластмасс, а также коррозионно устойчивых материалов: латуни, меди, нержавеющей стали. В период опытно-фильтрационных исследований и режимных

(по В. В. Дубровскому)

Таблица 5

вня к глубине погружения смесителя						Рекомендуемые диаметры труб в мм (диаметр условного прохода) для откачки эрлифтом при расположении труб				
уровня излива воды), м						внутри		рядом		
40	50	60	45	55	70	водоподъемных	воздухо-проводных	водоподъемных	воздухо-проводных	
80	100	120	74,7	91,3	116,2	—	—	—	—	—
83	103	123	77,7	94,3	119,2	—	—	—	—	—
88	110	130	83	100	120	—	—	—	—	—
4	5	6	3	3,6	4,6	—	—	—	—	—
7,5	8,35	9,15	11,76	13,2	14,61	—	—	—	—	—
0,63	0,68	0,7	0,97	1,1	1,25	40	15	32	15	
3,4	4,1	5,5	4,3	5,25	8,8	50	20	40	20	
1,26	1,36	1,6	1,95	2,16	2,5	80	20—25	70	20	
6,8	8,4	13	8,6	10,5	17,6	100	25	70	20	
2,52	2,7	3,35	3,9	4,32	5	125	25—32	100	25	
13,6	16,8	26	17,2	21	35	200	50	150	40	
3,8	4	4,2	5,84	6,48	7,5					
20	25	33	26	31,5	53					
6,3	6,7	7,2	9,74	10,8	12,5					
33,4	42	55	43,2	52,5	88					
12,6	13,4	14,5	19,5	21,6	25					
68	84	110	86	105	176					

наблюдений в течение 1—2 лет достаточно надежная защита стальных труб может быть обеспечена применением антикоррозионных покрытий: кремнийорганических соединений под товарным наименованием ВН-30, наиритов, эпоксидной смолы.

Наблюдательные скважины необходимо опробовать после окончания проходки и оборудования фильтрами с целью оценки скорости реагирования на возмущение пласта.

§ 3. НАСОСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для прокачки скважин и их разглинизации, а также проведения откачки из пескующих скважин широко применяются эрлифты. Оборудование для эрлифтной откачки состоит из компрессора, воздушных труб, смесителя, водоподъемных труб и замерного устройства для расхода воды с дегазатором. Применяются схемы компоновки воздушных труб с их центральным и параллельным расположением. Глубину погружения смесителя эрлифта можно определить по формуле

$$H = k'h, \quad (3.1)$$

где k' — коэффициент загрузки, равный 1,5—2,5; h — глубина динамического уровня.

В качестве источников сжатого воздуха используются обычно передвижные компрессорные станции ЗИФ-51, ЗИФ-55, ЛКС-5, ПК-10, ДК-9М и ЭК-9М производительностью от 4,65 до 10,5 м³/мин при максимальном давлении — 6—7 атм. Если требуется большая производительность, то компрессоры спариваются. При откачке воды с глубоких уровней применяются стационарные двухступенчатые компрессорные станции. Основные параметры эрлифта приведены в табл. 5.

Откачку из скважин с динамическим уровнем до 5—6 м целесообразно производить центробежными насосами с горизонтальным валом. Рекомендуется применять передвижные самовсасывающие насосы, агрегированные с электромоторами или двигателями внутреннего сгорания следующих марок: С-203, С-204, С-247А, С-245, С-490, С-666. Указанные насосы обеспечивают производительность от 24 до 120 м³/ч при напорах от 9 до 20 м.

Для откачки воды из скважин с малой производительностью могут быть использованы штанговые поршневые насосы. При диаметрах насосного цилиндра 3, 4 и 6 дюймов производительность этих насосов достигает соответственно 53, 94 и 212 м³/мин при напоре до 100 м.

Артезианские насосы с вертикальным валом типа АТН, А и НА предназначены для откачки чистой воды из строго вертикальных скважин. В последние годы насосы этого типа применяются редко в связи с широким внедрением в практику более технически со-

вершенных электропогружных насосов типа ЭЦВ, ЭПЛ, АГТ и др.

Технические характеристики артезианских насосов с вертикальным валом и электропогружных насосов приведены в табл. 6 и 7. Характеристики наиболее распространенных насосов даны на рис. 6.

Таблица 6
Техническая характеристика артезианских насосов с электродвигателем
над скважиной

Марка насоса	Габаритные размеры агрегата, мм		Вес, кг	Подача, м ³ /ч	Полный напор, м	Мощность двигателя, квт	Внутренний диаметр, мм		Число колес
	длина	диаметр					скважин-на	напорно-го патрубка	
ATH-8-1-16	67 222	188	2423	30	65	14	200	125	16
ATH-8-1-22	94 596	188	3234	30	90	20	200	125	22
ATH-10-1-4	34 952	238	1930	70	30	14	250	150	4
ATH-10-1-6	50 540	238	2832	70	45	20	250	150	6
ATH-10-1-8	66 200	238	3600	70	60	28	250	150	8
ATH-10-1-11	84 655	238	4600	70	80	40	250	150	11
ATH-10-1-13	105 415	238	5617	70	100	40	250	150	13
ATH-10-1-15	126 625	238	7500	70	115	45	250	150	15
12HA-9×4	11 083	290	1200	135; 40; 85	56; 53; 54	15	—	100	4
12HA-22×6	11 948	306	1360	20; 140; 160	58,5; 55; 48	32	—	150	6
12HA-3	32 230	285	2660	110; 150; 186	39,6; 33; 23	28	300	150	3
12HA-4	43 000	285	3450	110; 150; 196	52; 44; 34	40	300	150	4
12HA-5	53 690	285	4240	110; 150; 186	66; 55; 42	55	300	150	5
12HA-6	64 190	285	5170	110; 150; 186	79; 66; 47	75	300	150	6
12HA-7	74 880	285	5950	110; 150; 186	92; 77; 57	75	300	150	7
12HA-8	106 520	285	8250	110; 150; 186	106; 88; 64	75	300	150	8
ATH-14-1-3	54 647	340	6557	170; 260; 360	50; 37,5; 23	55	350	250	—
ATH-12-1-4	63 000	340	8000	170; 260; 360	68; 48; 30	75	—	—	4
ATH-14-1-6	104 810	340	11 083	170; 260; 360	100; 75; 46	100	350	250	6
20A-18×3	68 311	480	13 000	600	85	230	500	250	3
20A-18-1	25 770	480	5300	600—700	28; 22	90	500	250	1
20A-18-1	42 397	580	10 000	800—1400	53; 37	230	600	300	1

§ 4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

а. Приборы для измерения и регистрации уровня воды в скважинах

Все приборы для измерения и регистрации уровня можно подразделить на переносные и стационарные. К переносным приборам относятся электроровномеры, рулетки с хлопушкой.

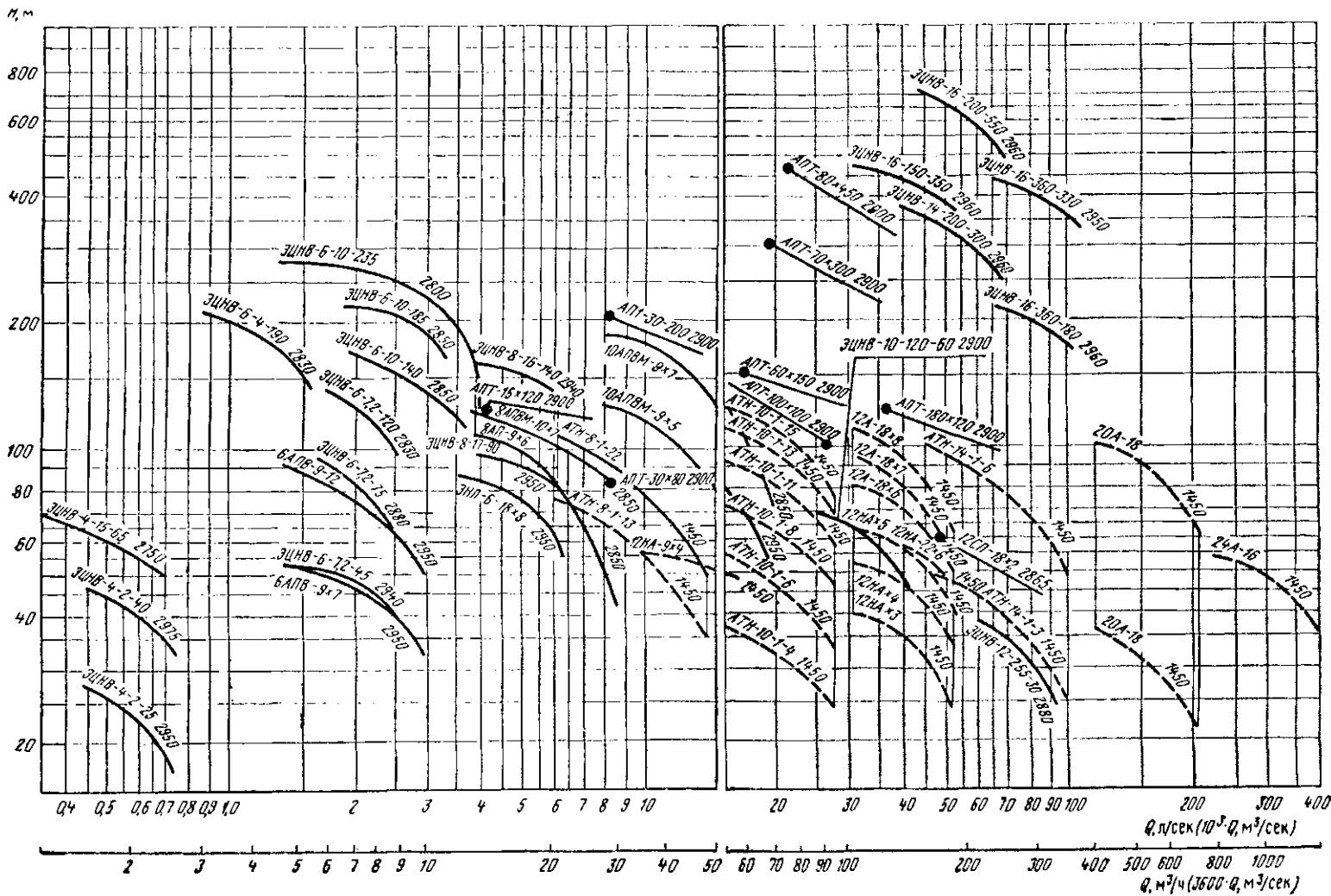


Рис. 6. Характеристики артезианских насосов

Таблица 7

Основные технические данные центробежных насосов с погруженными электродвигателями

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Напор, м. вод. ст.	Мощность электродвигателя, кВт	Число колес	Наибольший диаметр, мм
ЭЦВ-4-2-25	1,6; 2; 2,7	27; 24,5; 16,5	0,37	9	95
ЭЦВ-4-2-40	1,6; 2; 2,7	46; 42,5; 33,5	0,75	14	95
ЭЦВ-4-16-65	1,2; 2; 2,7	74; 60; 45	0,75	13	95
ЭЦВ-6-10-80	7—12	90; 67	4,5	10	142
ЭЦВ-6-4,5-180	3,2; 4,5; 5,7	207; 178; 136	4,5	22	142
ЭЦВ-6-4-130	3—6	140; 90	2,8	15	142
ЭЦВ-6-7,2-45	6; 7,2; 9,5	52; 48; 37	2,5	6	142
ЭЦВ-6-6,3-85	6,3	85	—	—	—
ЭЦВ-6-10-80	10	80	—	—	—
ЭЦВ-6-10-185	7; 10; 12	220; 192; 165	8—12	20	142
ЭЦВ-6-10-235	7; 10; 13	280; 240; 180	11	27	142
ЭЦВ-6-10-140	7,2; 10; 13	163; 140; 108	8	16	142
АПТ-15-20	15	120	10,5	7	190
ЭЦВ-8-17-90	14; 17; 20	98; 80; 90	12	6	185
ЭЦВ-8-16-85	13—21	100; 78	12	6	185
ЭЦВ-8-16-75	16	75	—	—	—
ЭЦВ-8-16-140	16	140	—	—	—
ЭПЛ-6-18-10	12; 18; 21	110; 91; 80	9,8	10	143
ЭПА-6-18-8	13; 18; 23	86; 75; 54	7,5—8	8	143
ЭЦВ-8-25-150	25	150	—	—	—
ЭЦВ-8-25-100	25	100	—	—	—
АПТ-30×80	30	80	10,5	6	188
ЭЦВ-8-40-165	40	165	—	—	—
ЭЦВ-8-40-120	40	120	—	—	—
АПТ-70-300	70	300	90	10	320
ЭЦВ-10-63-65	56—83	74; 56	22	3	234
АПТ-80-450	80	450	170	11	368
АПТ-100-100	100	100	45	3	285
ЭЦВ-10-120-60	90; 120; 150	69; 60; 45	32	3	234
ЭЦВ-12-160-65	140—200	69; 55	45	2	281
ЭЦВ-12-160-100	140—210	110; 80	65	3	281
АПТ-180-120	180	120	90	3	273
ЭЦВ-12-210-25	250; 100	20—32	22	1	281
ЭЦВ-16.150.350Б	110; 160; 200	454; 410; 332	250	8	369
ЭЦВ-14-210-300	210	300	—	—	—
ЭЦВ-16-200-550	160; 210; 260	670; 593; 464	500	12	327
ЭЦВ-12-255-30	185; 250; 300	41; 36; 29	32	1	278
ЭЦВ-16-360-360	240; 300; 360	425; 395; 348	500	6	358

Электроуровнемеры. Электроуровнемеры, серийно выпускаемые промышленностью, позволяют замерять уровень воды в скважинах по электросигналу, возникающему при соприкосновении датчика электрода с поверхностью воды (рис. 7).

Из электроуровнемеров применяются лишь ЭВ-1М, хотя электроуровнемеры УЭ выгодно отличаются от первых простотой, малыми габаритами, надежностью в работе. Основные недостатки электроуровнемеров ЭВ-1М: низкое качество мерного провода и его разметки, неудовлетворительная работа электрической схемы.

Рулетки. Наиболее распространены и серийно выпускаются гидрогеологические рулетки и катушки двух типов: Р-50 и ГГП-126. Они позволяют производить замеры уровня в случае открытого ствола скважины или при наличии большого межтрубного зазора при глубинах не более 100 м. Технические данные по переносным приборам приведены в табл. 8.

Наибольшее применение нашли катушки и рулетки с хлопушкой. Их основные недостатки — неудовлетворительное качество разметки мерного троса, что в конечном итоге приводит к большим погрешностям.

Рис. 7. Электрическая схема электроуровнемера ЭВ-1М.

1 — лампочка-индикатор; 2 — реле РСМ-2; 3 — батарея типа КБСЛ; 4 — барабан с приводом; 5 — электрод

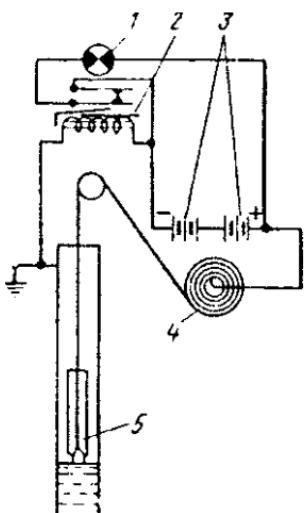


Таблица 8
Приборы для разовых замеров уровня воды в скважинах

Марка прибора	Техническая характеристика						Недостатки
	Глубина замера уровня, м	Погрешность измерения*, см	Тип датчика	Габарит датчика, см	Вес, кг	Электрическое питание	
РС-20	20	± 2	Хлопушка	16	0,8	—	Мерная лента подвергается коррозии
Р-50	50	± 30	»	40	1,2	—	Некачественная разметка мерного троса
ГГП-12	100	40—50	»	40	2,3	—	То же
ЭВ-1М	200	50—100	Электрод	20	5	2 батареи КБС-Л-0,50	Коммутирующее реле выходит из строя; при отрицательных температурах оплётка провода теряет эластичность и разрушается
УЭ-50	50	—	»	12	2,9	1 батарея КБС-Л-0,50	Нарушается изоляция провода, сбиваются бирки
УЭ-75	75	—	»	12	3,1	То же	То же
УЭ-200	200	—	»	12	4,3	»	»

* Указаны погрешности, определенные экспериментально по ВСЕГИНГЕО.

Исследования показывают, что погрешности измерения уровня с помощью приборов для разовых замеров могут достигать ± 30 см и более. Основной составляющей погрешности является погрешность разметки. Поэтому из общего количества эксплуатируемых приборов целесообразно произвести тарировку нескольких, а остальными производить замеры из расчета прикрепления каждого

прибора к определенной скважине, первоначальный уровень в которой установлен эталонным прибором. В этом случае приборы для разовых замеров (главным образом электроуровнемеры) необходимо изготавливать таким образом, чтобы датчик (мерный провод с электродом) постоянно находился в скважине, а индикатор

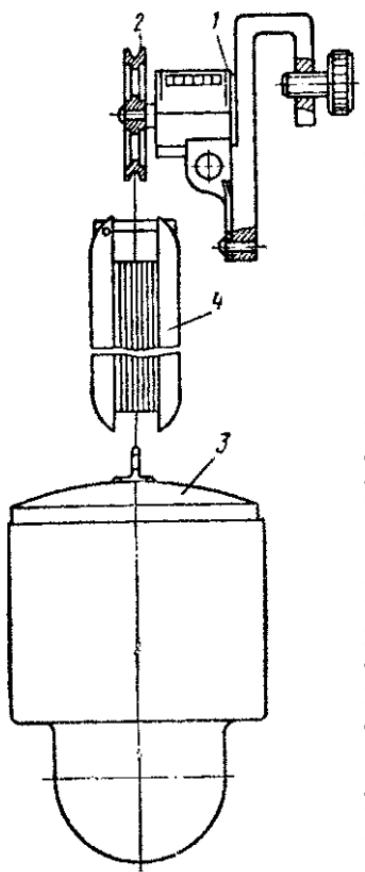


Рис. 8. Барабанный уровень УБ-1.

1 — счетчик; 2 — ролик; 3 — поплавок; 4 — противовес

тая лента с делениями через 1 см. Ленточный уровнемер можно применять в скважинах с глубиной уровня воды до 5—6 м.

Регистрирующие приборы. В табл. 9 приведены технические характеристики регистрирующих приборов. Общие и характерные для поплавковых приборов недостатки — зависимость чувствительности прибора от диаметра поплавка, наличие трущихся о стенки скважины соединительной нити, противовеса и самого поплавка. Положительные качества поплавковых приборов — простота конструкции, обслуживания и эксплуатации.

был переносным и мог быть использован наблюдателем для ряда скважин. Это позволит отметить глубину залегания уровня определять прямым измерением тщательно выверенным прибором, а в дальнейшем замерять колебания уровня относительно определенной точки. В этом случае можно с достаточной достоверностью считать, что замер уровня выполняется с точностью $\pm 1\div 2$ см. Изготовление комплекта датчиков с одним индикатором позволит: а) уделить приборы; б) повысить точность производства замеров; в) резко снизить время проведения замеров; г) увеличить срок эксплуатации приборов. Существующие стационарные приборы можно разделить на показывающие и регистрирующие.

Показывающие приборы. Из показывающих приборов в настоящее время выпускается серийно лишь поплавковый уровнемер УБ-1 (рис. 8). Прибор предназначен для непрерывного измерения уровня воды в наблюдательных скважинах. Основной недостаток прибора — малое перемещающее усилие, создаваемое поплавком. Экспериментально установлено, что прибор применим при глубинах залегания уровня в пределах 10—15 м, погрешность прибора может достигать $\pm 3\div 5$ см.

Ленточный уровнемер по принципу действия напоминает барабанный, только вместо троса в нем kleenчан-

Технические данные регистрирующих приборов

Таблица 9

Марка прибора	Техническая характеристика								Замечания по эксплуатации
	Глубина замера уровня, м	Амплитуда, м	Максимальная погрешность, см	Вид регистрации	Срок автономной работы, сутки	Привод	Исполнение прибора	Габариты датчика, мм	
СУВ-М «Валдай»	6	6	±1	Кри- вая	1	Часовой механизм	Над- сква- жинное	250	Чувствитель- ности около 1 см. Применим в сква- жинах диаметром 260 мм и выше
ГР-38	6	6	±1	»	30	То же	То же	250	То же
СУВ-3	100	3,6	±5	»	7	»	»	250	Чувствитель- ность 2—3 см; на- дежно работает при глубине скважины до 15—20 м;
ГГП-20	100	20	±2	Циф- ры	60	Электри- ческое питание от 16 ба- тарей	Сква- жинное		Неудобен из-за больших габари- тов; сложен в экс- плуатации и ремон- те
РУЦ-2М	60	±5	±3	»	300	Электри- ческое питание от 5 ба- тарей 145 «у»	То же		Выпущена опыт- ная партия (40 шт.)

Наибольшее распространение из представленных в табл. 9 приборов получил самописец СУВ-3. Прибор предназначен для непрерывной регистрации изменений уровня подземных вод в скважинах диаметров от 3 до 8 дюймов (рис. 9). Действие самописца основано на передаче записывающему устройству движений поплавка, совершающих вместе с изменением уровня воды. Положительные качества прибора: размещение противовеса в корпусе прибора, что предотвращает перехлестывание нити поплавка и противовеса и уменьшает трение о стенки скважины; большой диаметр поплавкового колеса увеличивает чувствительность прибора до 2—3 см при диаметре поплавка 70 мм. Недостатки прибора: малый срок автономной работы, надскважинный монтаж прибора, несовершенство узла записи, неудовлетворительное антикоррозионное покрытие.

Самописец СУВ-М «Валдай» по существу является гидрологическим прибором, предназначенным для измерения и регистрации уровня в открытых водотоках и скважинах диаметром не менее 250 мм. Часовой механизм прибора работает от гиревого привода.

Самописец уровня воды ГР-38 по конструкции и технической характеристике подобен самописцу СУВ-М «Валдай», с той лишь разницей, что срок автономной работы без смены диаграммы составляет 30 суток.

Наличие поплавка диаметром 250 мм обусловливает сравнительно неширокое применение этих приборов.

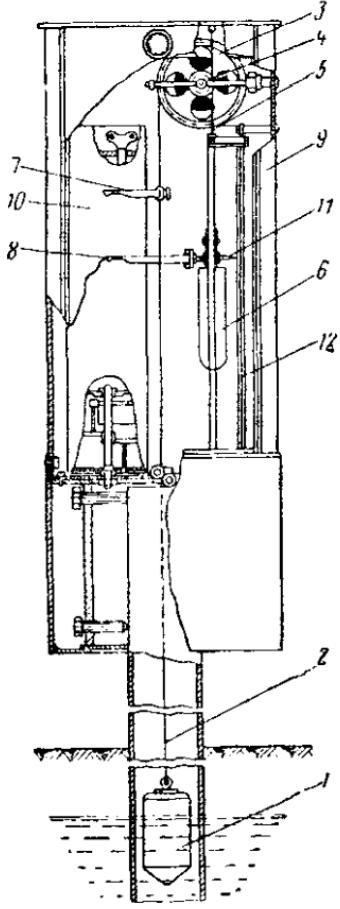


Рис. 9. Самописец уровня воды СУВ-3.

1 — поплавок; 2 — трос; 3 — большой блок; 4 — катушка; 5 — малый блок; 6 — противовес; 7 — перо-вилка; 8 — перо; 9 — корпус прибора; 10 — барабан; 11 — указатель глубины; 12 — ребка



Рис. 10. Регистратор уровня воды цифропечатающий РУЦ-2М

Приборы РУЦ-2М и ГГП-20 по техническим данным превосходят известные приборы, но они еще находятся в стадии опытного внедрения.

Регистратор уровня цифропечатающий РУЦ-2М (рис. 10) предназначен для автоматического измерения и реги-

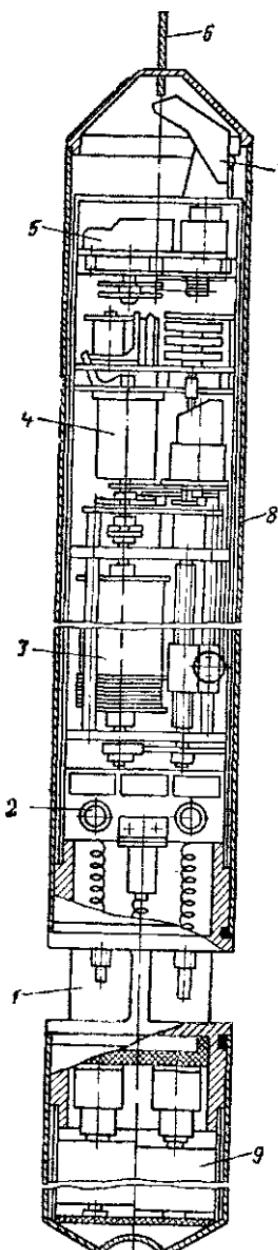


Рис. 11. Уровнемер ГГП-20

1 — блок электродов; 2 — транзисторный блок; 3 — подъемный механизм; 4 — вечно-печатывающее устройство; 5 — реле времени; 6 — трос; 7 — зажимное устройство; 8 — корпус прибора; 9 — блок питания

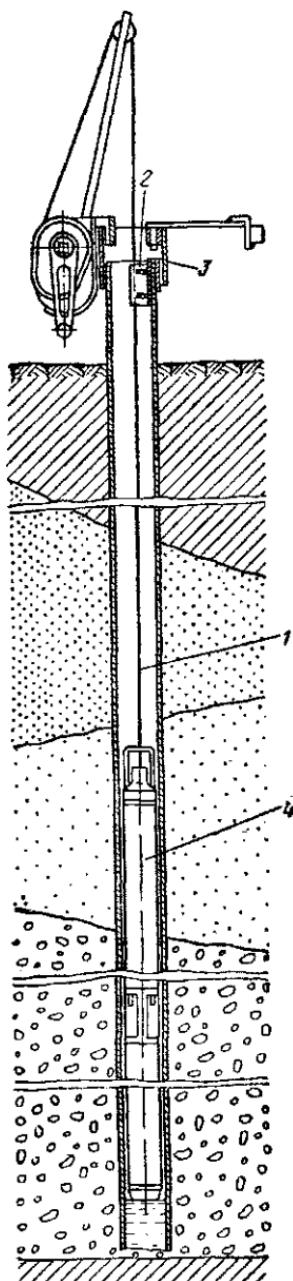


Рис. 12. Установка уровнемера ГГП-20 в скважине.

1 — трос; 2 — зажим; 3 — оголовок; 4 — прибор

стрии уровня воды в наблюдательных скважинах диаметром 3 дюйма и выше через определенные промежутки времени.

Уровнемер ГГП-20 предназначен для автоматического измерения и регистрации уровня воды в режимных гидрогеологических скважинах, обсаженных трубами с внутренним диаметром не менее 81 мм (рис. 11, 12). ГГП-20 — автономный автоматический прибор дискретного действия.

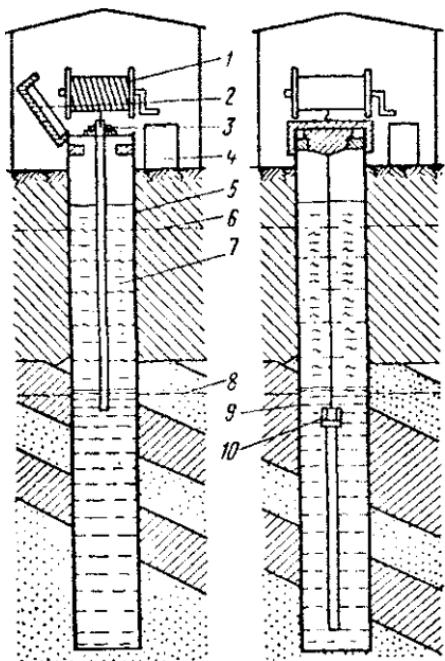


Рис. 13. Схема измерения уровня воды в замерзающих скважинах.

1 — лебедка; 2 — крышка на устье обсадных труб; 3 — подкладная вилка; 4 — бачок для дизтоплива; 5 — обсадные трубы; 6 — положение статического уровня воды; 7 — столб замерзшего в скважину дизтоплива; 8 — нижняя граница распространения многолетней мерзлоты; 9 — колонна замерзших трубок; 10 — герметическая крышка колонны замерзших трубок

При бурении скважин в многолетнемерзлых породах в зимнее время возникают трудности при замере уровня, связанные с образованием ледяных пробок. В этих случаях разбуривают ледяные пробки, прогревают ствол скважины паром или электрическим током.

При опробовании наблюдательных скважин в многолетнемерзлых породах верхний участок скважины заливается дизельным топливом [8]. Вышележащие горизонты не загрязняются потому, что температура их ниже нуля. При измерении уровня в скважину на специальной лебедке опускается колонна замерзших трубок диаметром 1—3/4 дюйма (рис. 13), нижняя часть которых закрыта герметично стеклом. При спуске трубок с помощью металлического щупа проверяется возможность попадания в них масла; если оно не обнаружено, то щупом разбивается стекло, после чего можно производить измерение уровня воды в трубках. После выполнения не-

обходимых замеров верхняя часть замерзших трубок закрывается герметичным оголовком и опускается на забой скважины. При необходимости последующих измерений замерзные трубы поднимаются и герметичный оголовок с них снимается.

Петингиль [8] описывает специальное устройство, выполненное на скважинах режимной сети, позволяющее избежать образования ледяных пробок в скважине. Для этой цели у скважины монтируется баллон со сжатым воздухом и игольчатым вентилем. Сжатый воздух подается по тонким трубкам в скважину. Трубки опускаются на определенную глубину. Выходящий из них воздух

устремляется вверх и тем самым способствует движению более теплой воды из нижних участков скважины в верхние, что исключает образование льда.

Для измерения и регистрации пластового давления в скважине применяются глубинные манометры. Эти приборы позволяют измерять и регистрировать давление по стволу скважины и пластовое давление при опробовании скважин пластоиспытателем.

Давление жидкости в глубинных манометрах передается либо на сильфон или поршень, либо на многовитковую пружину Бурдона. Перемещение пера характеризует изменение величины давления. Запись давления производится на диаграммной ленте, приводимой в движение с помощью часовом механизма (рис. 14).

Глубинные дифференциальные манометры относятся к группе прецизионных приборов. В отличие от глубинных манометров МГГ-2У, МГП и МГЛ дифференциальные манометры регистрируют измеряемое давление не от нуля, а от некоторого начального давления, что обеспечивает высокую точность регистрации изменяющегося параметра (давления). Промышленностью выпускаются два типа дифференциальных глубинных манометров — ДГМ-2 и ДГМ-4.

Дистанционный глубинный манометр УДГМ-1 предназначен для дистанционных измерений давления под глубинным насосом. Прибор состоит из датчика давления, кабеля и вторичного прибора. В качестве вторичного прибора используется электронный уравновешивающий мост типа ЭМД-202.

Краткая техническая характеристика прибора УДГМ-1

Пределы измерения, кгс/см ²	0—100, 0—120
Максимальная погрешность измерения, % от предела измерения	2,5
Порог чувствительности, % от предела измерения	1
Скорость вращения диаграммы вторичного прибора, об/сек	1
Габариты глубинного пробора (датчика), мм	
длина	1510
диаметр	128

6. Приборы и оборудование для измерения и регистрации дебитов скважин и расхода воды

Все существующие приборы и приспособления для измерения и регистрации дебита в зависимости от способа измерения можно разделить на следующие основные группы:

1) приспособления для определения дебита объемным способом;

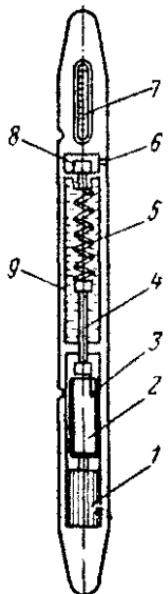


Рис. 14. Схема устройства поршневого манометра типа МГП.

1 — часовой механизм; 2 — вращающаяся каретка; 3 — перо; 4 — поршень; 5 — пружина; 6 — отверстие для передачи давления; 7 — термометр; 8 — фильтр; 9 — корпус

- 2) расходомеры постоянного перепада переменного уровня (водосливы);
- 3) водосчетчики (турбинные и крыльчатые расходомеры);
- 4) расходомеры переменного перепада давления;
- 5) расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры);
- 6) электромагнитные расходомеры.

Объемный способ нашел широкое применение при проведении гидрогеологических работ и является наиболее простым. Этот способ рекомендуется применять, как правило, при расходах не более 10 л/сек. Расход Q (в л/сек) можно определить по формуле

$$Q = \frac{V}{t},$$

где V — объем сосуда, л; t — время наполнения сосуда, сек.

Время наполнения сосуда во избежание неточности замеров должно быть не менее 30—40 сек. Замер расхода производится не менее трех раз, причем замеры не должны отличаться более чем на 5%.

Преимущества способа: простота изготовления, возможен непосредственный отсчет измеряемой величины. Недостатки: большая трудоемкость измерения, громоздкость и нетранспортабельность мерного бака (особенно для определения больших дебитов); невозможность непрерывной регистрации.

При расходах более 10 л/сек объемный способ измерения становится весьма трудоемким. Для таких расходов возможно применение водосливов. Они могут быть трапецидального, прямоугольного и треугольного сечений.

Принцип действия водосливов основан на замере расхода путем измерения в емкости высоты уровня жидкости, непрерывно поступающей и вытекающей через отверстия определенной формы.

Водослив состоит из желоба, перегородки и рейки с нанесенными делениями для измерения уровня. Определение расхода жидкости, протекающей через водослив, производится по шкале водослива.

Расход воды при использовании трапецидального водослива можно определить по формуле

$$Q = 0,0186b \cdot h \cdot \sqrt{h}, \quad (4.1)$$

где Q — расход воды, л/сек; b — ширина водослива в основании, см; h — высота уровня воды перед водосливным ребром, см.

Трапецидальные водосливы применяются при больших дебитах (30—50 л/сек и более). Для измерения дебитов менее 10 л/сек применяют прямоугольные и треугольные водосливы.

Расход воды можно определить:

для прямоугольного водослива по формуле

$$Q = 0,018 \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{h}, \quad (4.2)$$

для треугольного водослива по формуле

$$Q = 0,014 \cdot h^2 \cdot V \bar{h}. \quad (4.3)$$

В специальной литературе приводятся таблицы для определения расхода воды для различных типоразмеров водосливов.

Преимущества водосливов: простота конструкции и изготовления, возможность использования для измерения пульсирующих потоков. Недостатки: большие габариты и трудность транспортировки, необходимость обеспечения равномерности потока по ширине, невозможность автоматического измерения и регистрации.

К расходомерам переменного уровня может быть отнесен дебитомер ВНИИГСа, позволяющий измерять дебит по отсчету значений уровня по водомерному стеклу, отградуированному в л/сек. Прибор позволяет измерять расход до 64 л/сек с погрешностью $\pm 5\%$.

Для измерения расходов широко используются также водосчетчики (турбинные и крыльчатые расходомеры). Различают крыльчатые и турбинные скоростные водосчетчики. Водосчетчики измеряют скорость движения жидкости, величина которой для данного трубопровода будет пропорциональна расходу. Промышленное применение получили водосчетчики (водомеры) со спиральной вертлюшкой и крыльчаткой с горизонтальным и вертикальным расположением оси (рис. 15). Приборы этого типа измеряют мгновенный суммарный расход жидкости за истекший период времени. Технические характеристики наиболее распространенных крыльчатых и турбинных водосчетчиков приведены в табл. 10.

Для обеспечения правильной работы водосчетчиков их следует устанавливать таким образом, чтобы все сечение счетчика было полностью заполнено жидкостью. Перед счетчиком необходимо иметь прямой участок длиной (8 \div 10) D , а за ним — прямой участок длиной (3 \div 5) D , где D — диаметр трубопровода.

Преимущества водосчетчиков: невысокая стоимость, простота эксплуатации, отсутствие электропитания. Недостатки: невозможность использования при содержании значительного количества песка или другого абразивного вещества, инерционность измерительного устройства затрудняет измерение пульсирующего потока.

Расходомеры переменного перепада давлений основаны на измерениях перепада, создаваемого сужающим устройством, в качестве которых применяются диафрагмы, сопла или трубы Вентури и т. д. Расходомеры переменного перепада давлений состоят из следующих основных частей: 1) сужающего устройства; 2) измерителя перепада давления — дифференциального манометра; 3) вторичного регистрирующего прибора.

В качестве измерителей перепада давления наиболее широкое распространение получили дифманометры ДПЭМ, ДС и ДМ с пределами перепадов давлений от 0,1 до 1600 кгс/см².

Вторичными регистрирующими приборами могут служить автоматические самопищущие приборы ДС-1 с дифференциально-трансформаторной и индукционной схемой, предназначенные для работы в комплексе с датчиками ДМ, ДС, ДПЭМ.

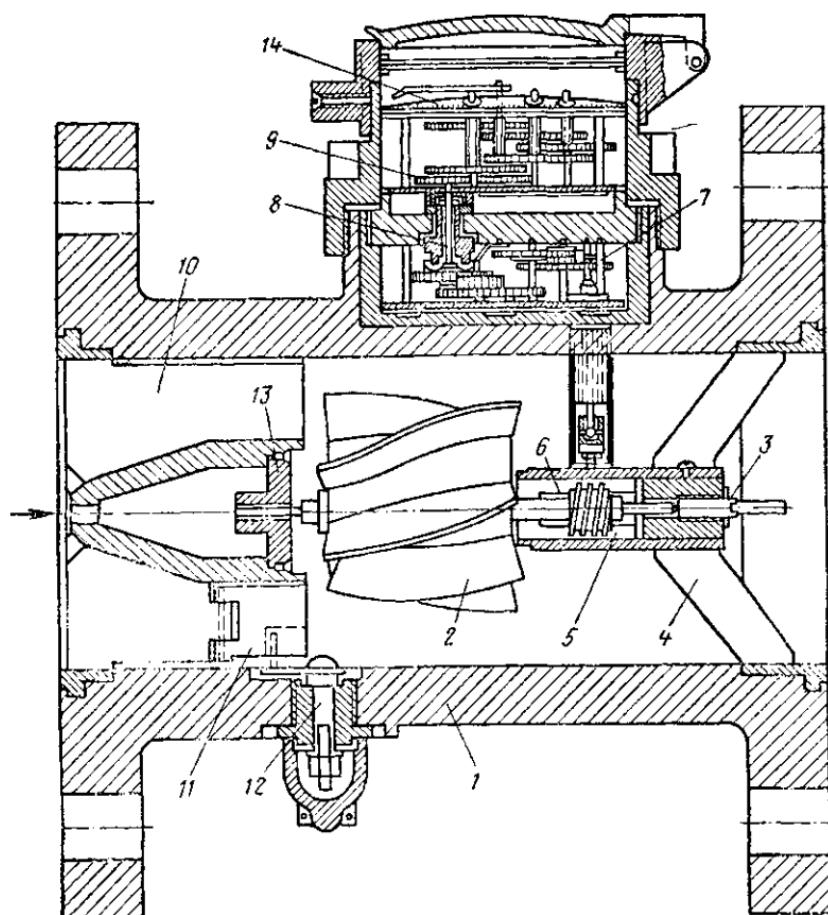


Рис. 15. Счетчик ВВ с горизонтальной вертушкой

1 — корпус; 2 — вертушка; 3 — подшипник; 4 — кронштейн; 5 — червяк; 6 — червячная шестерня; 7 — передаточный механизм; 8 — сальник; 9 — счетный механизм; 10 — струевыпрямитель; 11 — регулятор; 12 — рычаг регулятора; 13 — подшипник; 14 — шкала

В практике гидрогеологических исследований применяют кольцевую диафрагму, помещаемую в конце сливной линии. Диафрагма представляет собой кольцо, внутренняя часть ее с одной стороны имеет фаску шириной 5 мм под углом 60°, а с другой — кромку.

Определение расхода производится путем замера уровня в пьезометрической трубке H , устанавливаемой на расстоянии 600 мм от диафрагмы, и по расчетным таблицам [30]. Измерение расхода

жидкости с помощью диафрагмы может производиться для широкого диапазона значений расхода.

Таблица 10
Технические данные крыльчатых и турбинных водомеров *

Водомеры	Тип	Нижний предел измерений, м ³ /ч	Верхний предел измерений, м ³ /ч
Крыльчатые	BK-15	0,10	1,5
	BK-20	0,15	2,5
	BK-25	0,18	3,5
	BK-30	0,26	5
	BK-40	0,50	10
Турбинные (винтовые)	BB-50	3	22
	BB-80	6	80
	BB-100	8	140
	BB-150	12	320
	BB-200	18	550
	BB-250	32	820
	BB-300	60	1300

* Основная погрешность водомеров составляет, как правило, $\pm 5\%$ при 10%-ном расходе от номинального, $\pm 3\%$ при 15%-ном расходе и $\pm 2\%$ при нормальном расходе.

Существенным недостатком приборов этого типа является то, что при измерениях вода в трубопроводе должна быть исключительно чистой, при наличии в воде даже небольшого количества песчаных частиц точность измерения дебита снижается.

Преимущества расходомеров переменного перепада давления: высокая точность измерения и регистрации, возможность непрерывной регистрации расхода и количества откачиваемой жидкости. Недостатки: возможность установки только в стационарных условиях, невозможность измерения и регистрации расхода при наличии в воде абразивных частиц.

В практике используются также расходомеры постоянного перепада давлений (ротаметры). Принцип действия этих расходомеров основан на уравновешивании сил, действующих в потоке жидкости на поплавок весом самого поплавка.

Большинство серийно изготавляемых промышленностью ротаметров рассчитано для измерения или регистрации расхода в пределах 0,87—1,1 л/сек. В последнее время освоен выпуск ротаметров на большие расходы.

Преимущества ротаметров: простота конструкции и изготовления, возможность измерения расхода загрязненной и агрессивной жидкости, равномерность шкалы, постоянство относительной погрешности, большой диапазон измерений ($\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = 10 : 1$). Недостатки: зависимость показаний от удельного веса и вязкости измеряемого вещества; влияние на показание прибора его отклонения от

вертикального положения; небольшие перестановочные усилия, которые приводят к увеличению погрешности измерения при использовании датчика в регистрирующих приборах. Технические характеристики некоторых типов ротаметров даны в табл. 11 и 12.

Таблица 11
Технические характеристики стеклянных ротаметров для местного измерения расхода

Тип ротаметра	Максимальный предел измерения, м ³ /ч	Диаметр условного прохода, мм	Погрешность измерения, %
РС-1,6Ж	1,6	32	1,5
РС-2,5Ж	2,5	40	1,5
РС-4Ж	4	—	—

Таблица 12
Технические характеристики ротаметров с электрической дистанционной передачей показаний

Тип ротаметра	Максимальный предел измерения, м ³ /ч	Рабочее давление, кгс/см ²	Диаметр условного прохода, мм
РДР-304	0,4; 0,063; 0,1; 0,125; 0,32	16	16
РДР-306	0,03; 0,063	6	10
РЭМ-10Ж	10	16	70
РЭМ-16Ж	16	16	70
РЭМ-40Ж	40	16	
РЭМ-63Ж	63	16	125

В последнее время появились электромагнитные расходомеры, предназначенные для измерения и регистрации электропроводной жидкости, протекающей в трубопроводе. С помощью таких расходометров можно измерять расход откачиваемой из скважины воды. Электромагнитные расходомеры состоят из следующих основных частей: датчика-преобразователя, измерителя, или регистратора, блока питания и соединительных кабелей.

Действие расходометров основано на преобразовании в электромагнитном датчике расхода жидкости в электрическое напряжение и измерении или регистрации последнего. Энергия на датчик и измеритель подается от блока питания, который присоединяется к промышленной сети. Краткие технические характеристики электромагнитных расходометров приведены в табл. 13.

Преимущества электромагнитных расходометров: высокая надежность датчиков, возможность дистанционного измерения и регистрации расхода воды, содержащей взвешенные частицы. Недостатки: сложность эксплуатации, высокая стоимость, необходимость стабилизированного сетевого питания.

Технические характеристики электромагнитных расходомеров

Тип, марка расходометра	Пределы измерений, м ³ /ч	Максимальная погрешность, %	Назначение, область применения
ЭМР-1	0—12	5	Предназначен для измерения расхода промывочной жидкости — воды, глинистых растворов. Рассчитан на эксплуатацию в условиях бурения
РГР-7	0—27	5	Предназначен для измерения расхода промывочной жидкости в процессе бурения
ГРП-40	0—6 0—50 0—150	6	Предназначен для измерения на автоматической записи расхода воды в водоотводной магистрали и понижения уровня воды в скважине в процессе откачек
ИР-1М	0,3—160	2	Предназначен для непрерывного автоматического измерения жидкости в комплекте с регистраторами типа ЭПИД
4 РИ	10—400	1,6	

Таким образом, рассмотренные выше приборы для измерения и регистрации дебита скважин обладают как присущими им преимуществами, так и недостатками, поэтому все известные приборы следует разграничить по области применения в зависимости от видов проводимых работ. Все работы, в процессе проведения которых необходимы измерения и регистрация дебита скважин, можно условно разделить на две группы: 1) приборы для измерения и регистрации дебита при проведении опытных откачек (полевые приборы); 2) приборы для измерения и регистрации дебита на водозаборах (стационарные приборы).

Не останавливаясь на водоизъемных средствах, применяемых при том или ином виде проведения откачек, разграничим откачки с точки зрения наличия или отсутствия электроэнергии промышленной частоты.

При наличии электроэнергии дебит можно автоматически измерять и регистрировать электромагнитными расходомерами (независимо от пульсации и степени загрязненности жидкости) и расходомерами переменного перепада.

Если откачиваемая жидкость не содержит песка и буровой муты для измерения расхода, при отсутствии электроэнергии можно применять серийно выпускаемые промышленностью водосчетчики. Если же жидкость содержит песок, то при небольших дебитах можно применять объемный метод измерения расхода.

Таким образом, существующие приборы позволяют автоматически измерять и регистрировать дебит в полевых и стационарных условиях при наличии электроэнергии; измерять дебит воды в полевых условиях.

С помощью тампонов можно производить опытные нагнетания и наливы в отдельные интервалы скважины, а также определять напоры водоносных горизонтов. Общим в конструкции всех тампонов является наличие уплотнительного устройства — пакера, с помощью которого создается изоляция ствола скважины.

Тампоны применяются главным образом в устойчивых породах. По конструкции тампоны подразделяются на одинарные и двойные.

Одинарные тампоны позволяют разбить ствол скважины на два участка, двойные — на три.

Наиболее широкое применение в практике опытно-фильтрационных работ получили тампоны «Ирыкла», «Днепростроя», УКН-1М, ДАУ-1 и др.

Тампон «Ирыкла» (рис. 16) является одинарным тампоном механического действия. Разобщение ствола скважины осуществляется разжатием резиновых колец путем натяжки внутренних труб через винтовой домкрат. Испытываемый участок скважины сообщается с атмосферой через кольцевой зазор между внутренними и внешними трубами. Тампон «Ирыкла» серийно изготавливается экспериментальным ремонтно-механическим заводом Гидропроекта. Тампон «Днепрострой» в отличие от тампона «Ирыкла» является двойным тампоном механического действия, расстояние между двумя пакерами определяется длиной испытуемого участка скважины. Этот тампон позволяет производить поинтервальное опробование ствола скважины.

Унифицированный комплекс оборудования для опытных нагнетаний УКН-1М разработан и изготавливается Ленинградским экспериментальным ремонтно-механическим заводом Гидропроекта. Тампон УКН-1М отличается от тампона «Ирыкла» тем, что он поставляется в комплекте с измерительными приборами, мерными баками и другими приспособлениями. Тампон УКН-1М

Рис. 16. Тампон «Ирыкла»

1 — пазы; 2 — передвижная пластина; 3 — нижнее подвижное кольцо; 4 — шайба; 5 — резиновые кольца; 6 — опорные кольца; 7 — внешние трубы; 8 — внутренние трубы (штанги)

используется для опытных нагнетаний в скважины диаметром 89—145 мм.

Опытные нагнетания в скважины применяются главным образом в устойчивых породах. Изоляция участка скважины производится с помощью тампона, состоящего из собственно тампона, колонны упорных труб с натяжными штангами и головки. В комплект тампона входят сменные резиновые кольца, которые разжимаются с помощью упорных и натяжных штанг и позволяют применять тампон в скважинах различного диаметра.

Регулирование и измерение расхода воды с целью поддержания заданных ступеней давления осуществляется распределительным устройством. Мерные баки и насос с распределительным устройством соединяются напорными рукавами. Мерные баки позволяют измерять и поддерживать постоянный расход воды при нагнетании ее в скважину. Постоянный уровень воды в мерном баке поддерживается регулятором уровня.

В практике опытно-фильтрационных работ применяются также гидравлические тампоны. Наиболее широкое применение получили тампоны ТЛФ-4, конструкции Гидропроекта, тампоны конструкции А. И. Сизова, Н. У. Бурдака и др.

Тампон ДАУ-3 (рис. 17) создан и выпускается в Донбассе. По установке тампона на требуемую глубину производится подъем бурильных труб и перекрытие ствола скважины. После производства работ по нагнетанию тампон снимается путем вращения бурильных труб.

ВИТРом разработаны одинарные тампоны механического действия ПМ-108 и ПМ-89 (табл. 14). Срабатывание тампонов производится за счет натяжения с поверхности колонны бурильных труб, на которых спускаются тампоны.

Общим недостатком тампонов, спускаемых на бурильных трубах, является трудность учета гидравлических сопротивлений в колонне труб при больших расходах закачиваемой жидкости (более 0,5 л/сек).

Для глубоких скважин могут применяться одинарные самоуплотняющиеся тампоны механического действия ПС5-500 и ПС6-500, предназначенные для разобщения глубоких нефтяных и газовых скважин. Эти тампоны используются соответственно в обсадных колоннах с внутренним диаметром соответственно 122—132 и 144—154 мм, выдерживают перепад давления

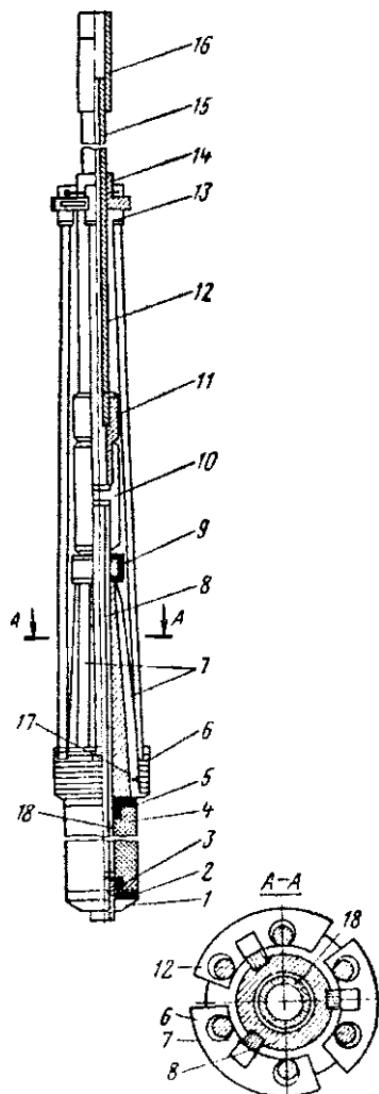


Рис. 17. Тампон ДАУ-3

1 — упорная шайба; 2 — нижняя шайба; 3 — пробка; 4 — резиновая манжета; 5 — шайба упора плашек; 6 — фиксирующие плашки; 7 — направляющие плашки; 8 — конус; 9 — накидная гайка; 10—11 — отсоединительный переходник с лено резьбой; 12 — тяга; 13 — головки тяги; 14 — подвижной фланец; 15 — бурильная труба Ø 33 мм; 16 — переходник; 17 — винт; 18 — бурильная труба Ø 33 мм

до 500 кгс/см². Спуск тампонов осуществляется на бурильных трубах.

Таблица 14
Краткая техническая характеристика тампонов

Показатели	Марка тампона	
	ПМ-108	ПМ-89
Наружный диаметр уплотняющего элемента (пакера), мм	108	89
Диаметр окружности, в которую вписывается пакер в крайнем верхнем положении, мм	110	90
Диаметр окружности, в которую вписывается плашки в крайнем нижнем положении, мм	130	112
Наименьший диаметр проходного отверстия пакера, мм	28	24
Длина уплотняющего элемента (пакера), мм	500	500
Общая длина тампона, мм	1750	1650
Масса тампона, кг	40	30

Глава II

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК И НАГНЕТАНИЙ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В качестве основного закона фильтрации, связывающего расход фильтрационного потока с потерями напора, обычно используется линейный закон Дарси, который имеет вид

$$v = kI, \quad (1.1)$$

где v — скорость фильтрации, представляющая собой расход фильтрационного потока, отнесенный к единичной площади его поперечного сечения; I — градиент напора; k — коэффициент фильтрации, являющийся важнейшим фильтрационным параметром. Коэффициент фильтрации имеет размерность скорости и может определяться как скорость фильтрации при единичном градиенте напора; при гидрогеологических расчетах обычно используется размерность $[k] = \text{м/сутки}$.

Величина коэффициента фильтрации зависит от гидродинамических свойств жидкости (вязкости и плотности), поэтому наряду с ним иногда оказывается целесообразным использовать понятие коэффициента проницаемости \bar{k} , который связан с коэффициентом фильтрации соотношением

$$k = \bar{k} \frac{\rho g}{\eta} = \bar{k} \frac{g}{\nu}, \quad (1.2)$$

где ρ — плотность жидкости; η и ν — коэффициенты динамической и кинематической вязкости; g — ускорение силы тяжести. Величина \bar{k} при неизменной геометрии пористой среды не зависит от свойств фильтрующейся жидкости. Коэффициент проницаемости широко используется, например, в нефтяной гидродинамике.

В физической системе единиц $[\bar{k}] = \text{см}^2$, но более употребительной является особая единица k , называемая дарси (d), причем $1\text{d} = 10^{-8} \text{ см}^2$. Для воды проницаемости $k = 1\text{d}$ примерно соответствует коэффициент фильтрации $k = 1 \text{ м/сутки}$.

Нарушение линейного закона фильтрации происходит при больших скоростях фильтрации, когда в потоке проявляются пульсационные силы, и основной закон фильтрации представляется в двухчленной форме [10]:

$$I = \frac{v}{k} (1 + \alpha v), \quad \alpha = \frac{0,3}{n^2} \sqrt{\frac{k}{\nu g}}, \quad (1.3)$$

где a — параметр нелинейности фильтрации; n — пористость породы.

Очевидно, что влияние нелинейности основного закона фильтрации следует учитывать, если величина av соизмерима с единицей. Следовательно, при допустимой погрешности в расчетах в критическая скорость фильтрации v_{kp} , определяющая верхнюю границу применимости закона Дарси, получится из условия

$$av_{kp} = \epsilon, \quad v_{kp} = \frac{\epsilon}{a}. \quad (1.4)$$

Теоретические и экспериментальные исследования показывают также, что в относительно слабопроницаемых породах может заметно проявляться вязкопластический характер фильтрации, обуславливающий нелинейность закона фильтрации и наличие начального градиента фильтрации, ниже которого фильтрационного течения не происходит. Однако все исследования в этом направлении пока, как правило, не выходят за рамки научных проработок, и при гидрогеологических расчетах эти особенности фильтрации в слабопроницаемых породах обычно не учитываются.

Изменение емкости пласта при его осушении или насыщении характеризуется коэффициентом отдачи (емкости) пласта μ , который представляет собой изменение количества воды в породе при колебаниях свободной поверхности, отнесенное к объему породы; при опускании свободной поверхности μ соответствует коэффициенту водоотдачи μ_b , а при повышении ее — коэффициенту недостатка насыщения μ_n . Для величин μ_b и μ_n можно записать следующие структурные формулы:

$$\mu_b = w_n - w_{ct} - w_{zb} - w_{cb} \quad (a); \quad \mu_n = w_n - w_e \quad (b), \quad (1.5)$$

где w_n — влажность грунта в насыщенном водой состоянии (под свободной поверхностью); w_{ct} — влажность стыковой воды (в углах пор); w_{cb} — объемное содержание связанный воды (максимальная молекулярная влагоемкость); w_e — влажность грунта над свободной поверхностью в естественном состоянии; w_{zb} — относительное объемное содержание защемленного воздуха. Для ориентировочной оценки в песчаных грунтах можно принимать $\mu = 0,2 - 0,25$, в супесчаных $\mu = 0,1 - 0,15$, в суглинистых $\mu = 0,01 - 0,10$.

На величину μ оказывает влияние динамика капиллярной зоны, причем при монотонном изменении уровня это влияние всегда приводит к уменьшению μ [10, 23].

Изменение емкости напорных пластов происходит за счет проявления их упругих свойств; оно характеризуется коэффициентом упругости породы η_{upr} , который определяется как изменение объема воды, отнесенное к объему породы при единичном изменении напора, и выражается формулой [10]:

$$\eta_{upr} = \frac{1}{1 + \epsilon} \left(\frac{\epsilon}{E} + a_v \right), \quad (1.6)$$

где γ и E — объемный вес и модуль упругости жидкости; ε и a_0 — коэффициенты пористости и сжимаемости породы.

Анализ материалов детальных разведок подземных вод показал [15], что в напорных водоносных пластах зоны активного водообмена изменения коэффициента упругоемкости пласта сравнительно невелики (практически $\mu_{\text{упр}} = 10^{-6} \div 10^{-5} \frac{1}{\text{м}}$).

Гидродинамика потоков, возникающих при откачках и нагнетаниях, существенно различается для скважин совершенных, полностью вскрывающих водоносный пласт своей рабочей частью (фильтром), и для несовершенных скважин, вскрывающих водоносный пласт лишь частично.

При откачках или нагнетаниях, проводимых в совершенных скважинах в изолированных пластах (при отсутствии вертикального водообмена в кровле и подошве пласта), поток имеет плановый характер (линии тока близки к горизонтальным).

При откачке из одиночной скважины в напорном пласте понижения уровня s на расстоянии r от скважины описываются дифференциальным уравнением радиального планового потока:

$$\mu_{\text{упр}} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r T \frac{\partial s}{\partial r} \right), \quad (1.7)$$

где $\mu_{\text{упр}}$ — коэффициент упругой емкости (отдачи) пласта, представляющий собой изменение объема воды в единичном элементе пласта (единичной площади в плане), отнесенное к изменению напора; T — проводимость пласта, характеризующая его водообильность. Для однородного по вертикали пласта мощностью m

$$T = km, \quad \mu_{\text{упр}} = m\mu_{\text{упр}}, \quad (1.8)$$

а для слоистого пласта величины T и $\mu_{\text{упр}}$ слагаются из их значений, определенных для каждого слоя в отдельности:

$$T = \sum_{i=1}^{n_c} k_i m_i, \quad \mu_{\text{упр}} = \sum_{i=1}^{n_c} m_i \mu_{\text{упр},i}, \quad (1.8a)$$

где $k_i, m_i \mu_{\text{упр},i}$ — значения параметров для номера слоя i ; n_c — число слоев в пласте*.

При постоянной проводимости уравнение (1.7) принимает вид

$$\frac{1}{a} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right), \quad a = \frac{T}{\mu_{\text{упр}}}, \quad (1.9)$$

* В отечественной гидрогеологической литературе проводимость нередко обозначается через « $k m$ », что по нашему мнению, неудачно, поскольку такое выражение проводимости справедливо только для однородного по вертикали пласта. Следует также иметь в виду, что обозначение проводимости через T принято во всей мировой гидрогеологической литературе [12].

где a — коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость передачи давления в напорных пластах; для однородного по вертикали пласта

$$a = \frac{k(1 + \epsilon)}{\gamma \left(\frac{\epsilon}{E} + a_0 \right)}. \quad (1.10)$$

В слоистых системах, представляющих собой чередование хорошо проницаемых (водоносных) и слабопроницаемых (разделяющих) слоев, откачки обычно проводятся из водоносных слоев, причем в этом случае уже требуется учитывать перетекание через разделяющие слои, залегающие в кровле и подошве опробуемого слоя. Дифференциальное уравнение для понижения уровня при откачке из однородного водоносного слоя проводимостью T будет в этом случае иметь вид

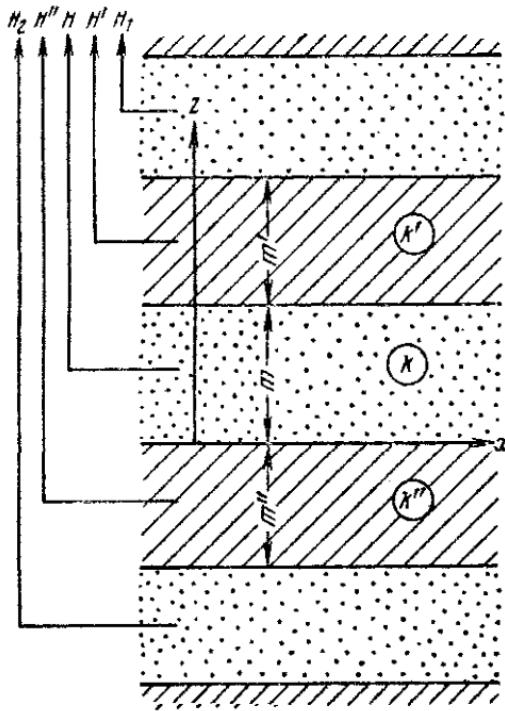


Рис. 18. Схема строения слоистой системы напорных пластов

$$\mu_{\text{упр}} \frac{ds}{dt} = T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + v_z' + v_z'', \quad (1.11)$$

где v_z' и v_z'' — скорости вертикального перетекания через разделяющие слои.

Если считать режим фильтрации в разделяющих слоях жестким, то

$$v_z' = k' \frac{s - s_1}{m'}, \quad v_z'' = k'' \frac{s - s_2}{m''}, \quad (1.12)$$

где s_1 и s_2 — понижения уровней в соседних с опробуемым водоносных слоях с напорами H_1 и H_2 (рис. 18). Тогда уравнение (1.11) после небольших преобразований принимает вид

$$\frac{1}{a} \frac{ds}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + b^2 (s - s^0); \quad (1.13)$$

где b — коэффициент перетекания

$$b = \sqrt{\frac{k'}{m'T} + \frac{k''}{m''T}}, \quad (1.14)$$

а s^0 — расчетное понижение уровня в соседних слоях

$$s^0 = \frac{k'm''s_1 + k''m's_2}{k'm'' + k''m'} \quad (1. 15)$$

Вместо коэффициента перетекания иногда используется параметр или фактор перетекания $B = \frac{1}{b}$ [8, 10, 12].

Если учитывать упругий режим в разделяющих слоях, то в число расчетных параметров, кроме того, войдут коэффициенты пьезопроводности a' и a'' разделяющих слоев.

Следует отметить, что до сих пор остается неясной реальность физических основ перетекания в слоистых системах, прежде всего из-за недоказанности возможности использования закона Дарси в слабопроницаемых породах разделяющих слоев. Кроме того, следует иметь в виду, что лабораторные данные не могут быть безоговорочно приложены к изучению фильтрации в слабопроницаемых пластах естественного сложения, поскольку последние имеют значительную микро- и макронеоднородность. Влияние макронеоднородности четко проявляется, например, если сравнить проницаемость образцов ненарушенной структуры, определяемую в лабораторных условиях, и данные полевых опытно-фильтрационных работ (последние обычно значительно выше).

Неоднородность и структурность строения слабопроницаемых разделяющих слоев дает основание предложить в этом случае в качестве более общей расчетную схему гетерогенной системы с двойной пористостью, широко используемую для изучения фильтрации в трещинно-пористой среде [2]. В такой постановке горная порода считается состоящей из системы пористых блоков, разбитых статически распределенными проводящими зонами (трещинами), причем фильтрация в основном происходит по трещинам, а пористые блоки играют роль добавочных емкостей (рис. 19, а). Характерным примером гетерогенной системы является слоистый пласт, состоящий из проводящих слоев, разделенных слабопроницаемыми слоями (рис. 19, б). Режим водообмена между пористыми блоками и проводящими зонами обычно считается квазистационарным, так что разница осредненных напоров в блоках и проводящих зонах (H' и H) оказывается пропорциональной интенсивности водообмена между ними, т. е. выражение для скорости фильтрации v_{th} внутреннего водообмена между трещинами и порами имеет вид

$$v_{th} = p(H - H'), \quad (1. 16)$$

где p — параметр внутриблокового перетекания; его величина должна быть прямо пропорциональна среднему коэффициенту фильтрации пористых блоков k' и обратно пропорциональна их среднему размеру, причем в случае слоистого строения пласта (см. рис. 19, б)

$$p = 4 \frac{k'}{m'}. \quad (1. 16a)$$

В такой постановке дифференциальные уравнения для понижения напора s_t и s_n в проницаемых зонах (трещинах) и пористых блоках имеют вид [10]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a_t} \frac{\partial s_t}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s_t}{\partial r} \right) + b_{nt} (s_t - s_n); \\ a_t = \frac{k_t}{\eta_t}; \quad b_{nt} = \frac{p}{k_t m_t}; \quad \frac{\eta_n \cdot m_n}{k_t m_t} \cdot \frac{\partial s_n}{\partial t} &= b_{nt} (s_n - s_t), \end{aligned} \right\} \quad (1. 17)$$

где k_t и a_t — коэффициенты фильтрации и пьезопроводности трещинного пространства; η_n и η_t — коэффициенты упругоемкости поровой и трещинной среды; m_n и m_t — средние размеры блоков и проводящих зон, b_{nt} — коэффициент внутреннего (порово-трещинного) водообмена.

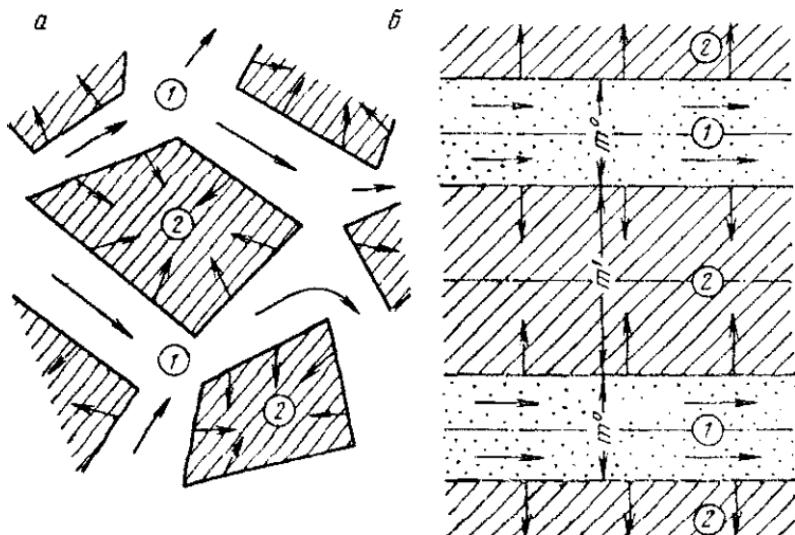


Рис. 19. Гетерогенная система с двойной пористостью:
а — трещинно-блочного строения; б — слоистого строения. 1 — проводящие зоны, 2 — пористые блоки — стабилизируемые слои

Заметим, что уравнения вида (1. 17) могут описывать процессы упругого режима фильтрации и с учетом процессов ползучести пористых блоков, рассматриваемых, например, как тело Шведова — Бингама [10].

Во всех приведенных выше уравнениях упругого режима фильтрации заложена предпосылка об абсолютной податливости кровли водоносных горизонтов. Однако в начальный период откачки, когда пьезометрическая воронка имеет кругой характер, на ее развитие может оказывать существенное влияние жесткость отложений, покрывающих опробуемый водоносный горизонт. Теоретический анализ показывает [16], что время t_{jk} , в течение которого следует считаться

с влиянием жесткости покрывающих отложений, оценивается по формуле

$$t_* = 0,5 \frac{M^2}{a} \sqrt{\frac{m}{M}}. \quad (1.18)$$

где M и m — мощности покрывающих отложений и водоносного пласта.

Близкая, но несколько специфическая по своей постановке задача возникает при изучении фильтрации в двухслойном пласте со свободной поверхностью (рис. 20).

В этом случае основную роль в балансе верхнего слоя играет гравитационная водоотдача и инфильтрационное питание на свободной поверхности, а упругая водоотдача в покровном слое имеет подчиненное значение. Уравнение баланса верхнего слоя в такой постановке примет вид

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = k_b \frac{H - h}{m_b} + W, \quad (1.19)$$

где h — ордината свободной поверхности в верхнем слое; H — напор в нижнем слое, а m_b — расчетная мощность верхнего слоя, зависящая от его строения; при однородном строении $m_b = h$, а для часто встречающегося случая, когда в нижней части покровного слоя залегает слабопроницаемый прослой, при $k_b = k'_b$ имеем

$$m_b = m'_b + (h - m'_b) \frac{k'_b}{k_b}. \quad (1.19a)$$

Уравнение (1.19), строго говоря, является нелинейным, поскольку величина m_b зависит от h , однако при решении практических задач этой зависимостью обычно можно пренебречь и линеаризовать уравнение (1.19), задавая в качестве расчетного осредненное значение m_b . Особенно уверенно можно применять такой прием, когда в нижней части залегает слабопроницаемый прослой, поскольку в этом случае зависимость m_b от h , определяемая выражением (1.19a), проявляется слабо.

Вводя вместо H и h соответствующие понижения уровней s и s_h и считая неизменной интенсивность инфильтрации W , представим уравнение (1.19) в виде

$$\mu \frac{\partial s_h}{\partial t} = \frac{k_b}{m_b} (s_h - s). \quad (1.19b)$$

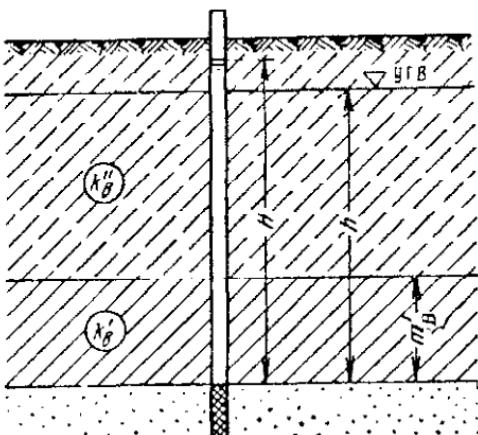


Рис. 20. Двухслойный пласт

Решая уравнение (1. 19б) совместно с уравнением баланса потока в нижнем слое, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{a} \frac{ds}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + b_v^2 (s_h - s); \quad b_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v T}}, \quad (1. 20)$$

где a и T — коэффициент пьезопроводности и проводимость нижнего слоя; b_v — коэффициент перетекания из верхнего слоя. При сопоставлении уравнений (1. 19б) — (1. 20) для двухслойного пласта с уравнениями (1.17) — (1.18) для гетерогенного пласта, можно видеть их идентичность, откуда следует, что закономерности фильтрации в таких случаях будут иметь одинаковый вид.

Глинистый характер покровных отложений предопределяет возможность существенного влияния капиллярной зоны на формирование фильтрационного потока в двухслойном пласте. Используя упрощенное уравнение вертикального водообмена капиллярной зоны [10, 23], когда вводится расчетная высота капиллярной зоны h_k^0 с осредненным коэффициентом k_k , можно показать, что уравнение для понижения напора в нижнем слое получается аналогичным уравнению (1. 20), в котором величину m_v следует заменить величиной $m_v + \frac{k_v}{k_k} h_k^0$.

Рядом натурных наблюдений и теоретическими исследованиями [27, 39] установлено заметное влияние вертикального перетекания в безнапорных пластах сравнительно однородного строения при длине потока, соизмеримой с его мощностью. В этом случае для описания вертикального водообмена можно пользоваться уравнением (1. 19), связывающим средний по вертикали напор H с ординатой свободной поверхности h , только вместо величины k_v задается вертикальный коэффициент фильтрации пласта k_z , а мощность верхнего слоя заменяется на расчетную высоту внутрипластового перетекания m_z , определяемую с учетом строения пласта по вертикалам; в частности, при однородном его строении $m_z = \frac{1}{3} h$, где h — глубина (мощность) потока.

При откачке из несовершенной скважины фильтрационный поток имеет уже пространственно-радиальный характер, и в общем случае понижения уровней в пласте s описываются уравнением упругого режима фильтрации в цилиндрических координатах

$$\eta_{\text{упр}} \frac{ds}{dt} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2}, \quad (1. 21)$$

где k и k_z — коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях.

При откачках в безнапорных пластах существенный приток к скважинам может осуществляться за счет снижения свободной поверхности потока. Тогда уравнение (1. 21) должно решаться с учетом следующих граничных условий на свободной поверхности: давление равно атмосферному (нулевому), так что в каждой ее

точке напор будет равен ординате относительно плоскости сравнения; кроме того, рассматривая кинематику потока на свободной поверхности [10], получим уравнение

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} - k \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 - k \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 + (W + k) \frac{\partial H}{\partial z} - W = 0. \quad (1.22)$$

При обычно имеющих место малых уклонах свободной поверхности можно пренебречь квадратами уклона и представлять условие (1.22) в упрощенном виде

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} + (W + k) \frac{\partial H}{\partial z} - W = 0. \quad (1.22a)$$

Влияние капиллярных сил в этом случае также может вызывать замедленное проявление динамики и водоотдачи.

Влияние естественного потока в расчетных зависимостях обычно исключается путем использования принципа суперпозиции, согласно которому изменения (понижения) уровней не зависят от естественного питания (в том числе и инфильтрационного), если только оно не меняется в процессе изменения уровней. В противном случае методика учета изменения питания при обработке данных опытных откачек должна рассматриваться особо.

Методика расчетов в дальнейшем будет дана в основном применительно к откачкам. Однако все эти зависимости можно непосредственно использовать и для обработки наливов (нагнетаний), заменяя только понижения уровней на их повышения, и наоборот.

§ 2. ОТКАЧКИ В ОДНОРОДНЫХ ИЗОЛИРОВАННЫХ НАПОРНЫХ ПЛАСТАХ

а. Основные теоретические положения

В изолированном напорном пласте приток к водозаборным скважинам формируется только за счет сработки статических (упругих) запасов пласта, величина которых характеризуется коэффициентом упругой емкости пласта μ_{up} (см. § 1). Фундаментальное решение, используемое для обработки опытных откачек в изолированном напорном пласте, получено Ч. Тейсом [10, 12] для условий откачки из однородного пласта проводимостью T с постоянным дебитом Q . Согласно этому решению понижение уровня s в любой точке на расстоянии r от центральной скважины в момент времени t , отсчитываемый от начала откачки, представляется выражением

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad (2.1)$$

которое получено решением уравнения (1.9) при условии стационарного режима фильтрации перед началом откачки и с заменой реальной скважины точечным стоком, т. е. без учета объема, заключенного в скважине; функция скважины $W(u)$ (well function по

Ч. Тейсу) соответствует специальной функции $Ei(-u)$, называемой интегральным экспоненциалом, и может быть представлена следующим образом:

$$W(u) = -Ei(-u) = \int_{-u}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = \ln \frac{1}{u} - 0,577 + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \dots \quad (2.2)$$

Таблица функции $W(u)$ приведена в приложении.

Уравнение (2.1) является приближенным, поскольку оно не полностью удовлетворяет граничному условию на стенке скважины, где расход Q_c определяется выражением

$$Q_c = Q e^{-u_c}, \quad u_c = \frac{r_c^2}{4at}, \quad (2.3)$$

т. е. приток к скважине оказывается переменным, лишь асимптотически (при $t \rightarrow \infty$) достигающим заданного дебита Q . Однако приближенность этого решения в большинстве случаев оказывается несущественной, поскольку величина Q_c , определяемая формулой (2.3), довольно быстро стремится к своему предельному значению Q .

Из общего выражения (2.2) для функции $W(u)$ следует, что при малых значениях аргумента она имеет логарифмическое представление

$$W(u) = \ln \frac{1}{u} - 0,577, \quad (2.4)$$

причем абсолютная погрешность такого представления практически равна аргументу u . С точностью до $5 \div 10\%$ оно применимо при условии

$$u = \frac{r^2}{4at} < 0,09 \div 0,15. \quad (2.5)$$

В этом случае уравнение (2.1) принимает вид

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1,5 \sqrt{at}}{r}, \quad (2.6)$$

а понижение в скважине радиуса r_c будет

$$s_c = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1,5 \sqrt{at}}{r_c}. \quad (2.7)$$

Вычитая выражения (2.6) и (2.7) одно из другого, находим, что разница понижений в скважине и в любой точке не зависит от времени и совпадает с выражением, определяемым уравнением Дюпюи, справедливым для стационарного режима:

$$s_c - s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_c}. \quad (2.8)$$

Таким образом, при выполнении условия (2.5) режим изменения уровней становится квазистационарным, когда уровни во времени

снижаются, но их распределение в каждый момент времени соответствует закономерностям стационарного режима и, в частности, описывается уравнением Дюпюи (2.8).

Типовой график понижения уровня в зависимости от времени, который следует из формулы Ч. Тейса, представлен в полулогарифмических координатах на рис. 21.

Выражение (2.7) можно записать в виде

$$s_c = \xi \frac{Q}{T}; \quad \xi = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1.5 \sqrt{at}}{r_0}. \quad (2.9)$$

Расчеты величин ξ при реальных значениях параметров показывают, что при небольшом сопротивлении прискважинной зоны они обычно меняются в сравнительно узких пределах, так что при ориентировочных расчетах можно определять величину s_c по формуле (2.9), полагая для безнапорных потоков $\xi = 0.9 - 1.2$, а для напорных $\xi = 1.3 - 1.5$.

На понижение уровня в центральной скважине существенное влияние может оказывать сопротивление прискважинной зоны, включая зону фильтра. Для учета этого сопротивления удобно пользоваться понятием расчетного радиуса скважины, который представляет собой радиус «чистой» скважины (не имеющей сопротивления прискважинной зоны), эквивалентной по своему сопротивлению действительной скважине. При этом для понижения уровня в скважине можно пользоваться уравнениями (2.8) и (2.9), заменяя в них r_c на r_c' . Дополнительные понижения уровня Δs_c в прискважинной зоне определяется тогда выражением

$$\Delta s_c = \frac{Q}{T} \Delta f_c; \quad \Delta f_c = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_c}{r_c'} = 0.366 \lg \frac{r_0}{r_c'}, \quad (2.10)$$

где Δf_c — безразмерное сопротивление прискважинной зоны, значения которого могут меняться в широком диапазоне.

При переменном дебите скважины чаще всего приходится встречаться с условиями резкой смены режимов откачки, когда можно считать, что дебит скважины меняется по ступенчатому закону (рис. 22). Исходя из фундаментального решения (2.1) для откачки с постоянным дебитом и используя принцип сложения течений [10, 36], получим следующее выражение для понижения уровня при откачке из скважины по ступенчатому дебиту:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) + \frac{\Delta Q_1}{4\pi T} W(u_1) + \frac{\Delta Q_2}{2\pi T} W(u_2) + \dots; \quad (2.11)$$



Рис. 21. График зависимости понижения уровня во времени (в полулогарифмических координатах) для откачки в изолированном пласте

$$u = \frac{r^2}{4at}; \quad u_1 = \frac{r^2}{4a(t-t_1)}; \quad u_2 = \frac{r^2}{4a(t-t_2)}.$$

В некоторых случаях (например, при откачке самоизливом) приходится рассматривать режим постоянного понижения уровня в скважине ($s_c = \text{const}$), когда для обработки результатов откачки используются данные о дебите откачки и уровнях в наблюдательных скважинах. Решение задачи о работе скважины с постоянным понижением уровня (или соответствующей тепловой задачи о стержне с постоянным изменением температуры) рассмотрено в

работах [8, 31]. Из этого решения, в частности, следует, что дебит такой скважины вскоре после начала откачки (с точностью до 10% при $at > 180 r_c^2$) можно определить по формуле

$$Q = \frac{4\pi T s_c}{\ln \frac{2,25at}{r_c^2}}. \quad (2.12)$$

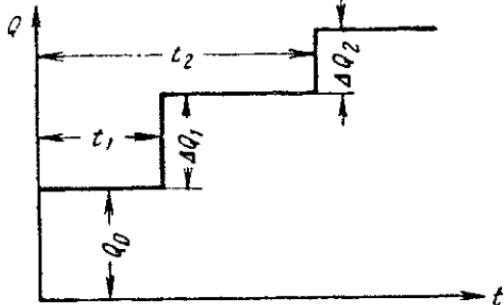


Рис. 22. График ступенчатого изменения дебита скважины

Понижения уровня s в любой точке, расположенной на расстоянии r от центральной, при достаточно длительных откачках (практически, когда $at > 500 r_c^2$) определяются формулой

$$s = s_c - \frac{W(u)}{\ln \frac{2,25at}{r_c^2}} = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad (2.12a)$$

где $W(u)$ — функция скважины, определяется согласно (2.2). Таким образом, выражение (2.12a) формально совпадает с выражениями (2.1) и (2.7) для откачки из скважины с постоянным дебитом.

В качестве типового, кроме того, может рассматриваться линейный закон изменения дебита откачивающей скважины вида $Q = at$, когда понижение в любой точке пласта определяется по формуле [8, 10, 34]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W_t(u); \quad W_t(u) = (1+u) W(u) - e^{-u}, \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad (2.13)$$

а при $u < 0,02$

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{0,83at}{r^2}. \quad (2.13a)$$

В периоды начала откачки или изменения ее режима может существенно проявляться влияние изменения емкости скважины.

Строгие решения для расчетов скважин с учетом этого фактора, рассмотренные в ряде работ [31, 37, 43], оказываются довольно сложными. Для практических расчетов можно применить упрощенную методику обработки опытных данных с учетом емкости скважины, исходя из того, что при монотонном понижении уровня в скважине их величины s_c имеют почти однозначную связь с откачиваемым расходом вне зависимости от характера их изменений во времени (это положение следует, в частности, из совпадения выражений (2.7), (2.12)). Таким образом, можно считать, что расход потока, извлекаемый из пласта $Q_c - \Delta Q_c$ (где через ΔQ_c обозначен расход воды, извлекаемой непосредственно из скважины) связан с понижением s_c выражением (2.7), т. е.

$$Q_c - \Delta Q_c = \frac{2\pi T s_c}{\ln \frac{1.5 \sqrt{at}}{r_c'}}, \quad \Delta Q_c = \omega_c v_c, \quad (2.14)$$

где ω_c — площадь горизонтального сечения скважины, а v_c — скорость понижения уровня воды в скважине в данный момент времени t .

При нарушениях линейного режима фильтрации, которые могут заметно проявляться при интенсивных откачках в гравелистых и сильно трещиноватых скальных породах, в качестве общего закона фильтрации следует использовать выражение (1.3). Поскольку эти нарушения обычно имеют локальный характер, то в зоне их проявления режим можно считать стационарным (или квазистационарным). В такой постановке разница понижений уровня s_c в центральной скважине и s в любой точке на расстоянии r от центральной определяется уравнением В. М. Насберга [25, 36]

$$s_c - s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_c} + \frac{a}{k} \left(\frac{Q}{2\pi T m} \right)^2 \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r} \right). \quad (2.15)$$

Следует иметь в виду, что заметные нарушения линейного режима течения в прискважинной зоне могут происходить только при условии, когда средняя скорость фильтрации на стенке скважины $v_{ct} = \frac{Q}{2\pi r_c l_c}$ (l_c — длина фильтровой части скважины) окажется больше критической скорости фильтрации v_{kp} , характеризующей верхнюю границу применимости линейного закона фильтрации. Ее величину можно оценить по формуле (1.4).

При высокодебитных откачках из сравнительно глубоких скважин могут заметно проявляться гидравлические потери в водоподъемных трубах; их величина ΔH_{tp} определяется по формуле Дарси—Вейсбаха

$$\Delta H_{tp} = 0.96 \cdot 10^{-6} \lambda L_{tp} \frac{Q^2}{d_{tp}^5}, \quad (2.16)$$

где Q — дебит скважины, $\text{м}^3/\text{сутки}$; d_{tp} и L_{tp} — диаметр и длина водоподъемных труб, м; λ — коэффициент сопротивления, определяемый

по формулам Ф. А. Шевелева [5]: для переходного режима (при $\frac{Q}{\sqrt{d_{tr}^2}} < 6,25 \cdot 10^{10} \frac{1}{m}$)

$$\lambda = \frac{0,0179}{d^{0,3}} \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3}; \quad (2.16a)$$

для турбулентного режима (при $\frac{Q}{\sqrt{d_{tr}^2}} > 6,25 \cdot 10^{10} \frac{1}{m}$)

$$\lambda = \frac{0,021}{d^{0,3}}. \quad (2.16b)$$

В табл. 15 приведены результаты расчета потерь напора ΔH_{tr} в метрах на 1000 м длины труб в зависимости от Q и d_{tr} .

Таблица 15
Потери напора в трубах

Дебит Q , $m^3/\text{сутки}$	$d_{tr} = 0,122 \text{ м}$	$d_{tr} = 0,144 \text{ м}$	$d_{tr} = 0,197 \text{ м}$
500	4,6	2,0	0,5
1000	16,6	7,2	1,55
1500	36,6	18,7	3,2
2000	65,4	27,0	5,4
2500	102,0	42,0	8,2
3000	147,1	60,6	11,55

При построении расчетных зависимостей для групповых откачек, проводимых из нескольких центральных скважин, используется принцип суперпозиции (сложения течений), согласно которому в потоках с неизменной проводимостью понижение уровня под действием откачки из системы скважин определяется как сумма понижений от действия каждой скважины в отдельности. Например, при откачках с постоянным дебитом в однородном неограниченном напорном пласте, где понижение уровня под действием одной скважины определяется формулой (2.1), общее понижение уровня при работе системы i -го числа скважин определяется уравнением

$$s = s_1 + s_2 + \dots + s_i = \\ = \frac{Q_1}{4\pi T} W(u_1) + \frac{Q_2}{4\pi T} W(u_2) + \dots + \frac{Q_i}{4\pi T} W(u_i); \quad (2.17)$$

$$u_1 = \frac{r_1^2}{4a(t - t_1)}, \quad u_2 = \frac{r_2^2}{4a(t - t_2)}, \dots, \quad u_i = \frac{r_i^2}{4a(t - t_i)}, \quad (2.17a)$$

где r_1, r_2, \dots, r_i — расстояния от центральных скважин номера 1, 2, ..., i до расчетной точки (наблюдательной скважины); Q_1, Q_2, \dots, Q_i — дебиты скважин номера 1, 2, ..., i ; t_1, t_2, \dots, t_i — время начала откачки из скважины номера 1, 2, ..., i .

Наиболее простые способы определения проводимости пласта и сопротивления прискважинной зоны основываются на обработке кустовых откачек в зоне стационарного (квазистационарного) режима с использованием в качестве исходной зависимости уравнения Дюпюи. Для определения осредненной величины проводимости, исходя из уравнения вида (2.8), целесообразно построить график зависимости понижения уровня s в наблюдательных скважинах от $\lg r$, где r — расстояние до наблюдательной скважины. Согласно уравнению (2.8), точки на этом графике должны лежать

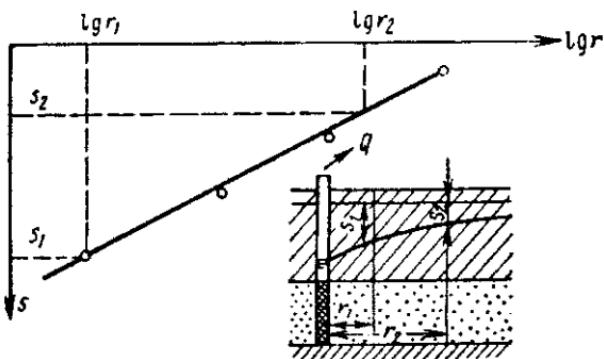


Рис. 23. График зависимости s от $\lg r$

на одну прямую линию, угол наклона которой к оси $\lg r$ равен $0,366 \frac{Q}{T}$ (рис. 23). Практически удобно, проведя такую прямую по опытным точкам, снять с нее значения двух понижений s_1 и s_2 , соответствующие значениям $\lg r_1$ и $\lg r_2$, после чего определить проводимость по формуле

$$T = 0,366 \frac{Q}{s_2 - s_1} \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.18)$$

Формулу (2.18) можно применять и для определения проводимости по разнице понижений s_2 и s_1 в двух наблюдательных скважинах, расположенных на расстояниях r_2 и r_1 от центральной.

Для приближенной обработки данных одиночной откачки можно пользоваться формулой (2.9), согласно которой

$$T = \xi \frac{Q}{s_c}, \quad (2.19)$$

причем величина ξ принимается по приведенным выше рекомендациям.

Сопротивление прискважинной зоны лучше всего можно оценить, если в зоне квазистационарного режима имеется одна наблю-

дательная скважина на расстоянии r с понижением s . Тогда можно использовать уравнение (2.8) при $r_c = r'_c$, записав его в виде

$$s_c - s = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{r}{r_c} + \ln \frac{r_c}{r'_c} \right) = \frac{Q}{T} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{r_c} + \Delta f_c \right), \quad (2.21)$$

где Δf_c — безразмерное сопротивление прискважинной зоны, определяемое выражением (2.10); из (2.21) следует формула для определения его величины

$$\Delta f_c = \frac{(s_c - s) T}{Q} - 0,366 \lg \frac{r}{r_c}. \quad (2.22)$$

При заметных проявлениях нелинейного режима фильтрации, когда понижения уровня в прискважинной зоне описываются уравнением (2.15), величина Δf_c , определяемая по формуле (2.22), имеет следующую структуру:

$$\Delta f_c = \Delta f_c^0 + \frac{\alpha Q}{4\pi^2 m r_c}, \quad (2.23)$$

где величина Δf_c^0 представляет собой безразмерное сопротивление прискважинной зоны при линейном режиме фильтрации, а последний член этого выражения учитывает влияние нелинейной фильтрации. Для раздельного определения параметров Δf_c^0 и α следует провести откачуку при нескольких величинах дебитов (по крайней мере, при двух) и построить график зависимости Δf_c от Q , который должен иметь прямолинейный характер, причем эта прямая отсекает на оси Δf_c величину Δf_c^0 и имеет наклон к оси Q , равный $\frac{\alpha}{4\pi^2 m r_c}$.

Если расчеты ведутся по данным замеров уровней на устье скважины, то аналогичным путем можно выявлять влияние гидравлических потерь в трубах. В этом случае, исходя из выражения (2.16) для потерь напора в трубах, будем иметь следующую структурную формулу для величины Δf_c :

$$\Delta f_c = \Delta f_c^0 + \varphi_{tp} T Q; \quad (2.24)$$

$$\varphi_{tp} = 0,96 \cdot 10^{-6} \frac{\lambda L_{tp}}{d_{tp}^5}. \quad (2.24a)$$

Таким образом, определив по формуле (2.22) величину Δf_c для различных Q и построив график зависимости Δf_c от Q , можно найти величину φ_{tp} , имея в виду, что этот график должен быть прямолинейным с наклоном к оси Q , равным $\varphi_{tp} T$. Величина φ_{tp} должна при этом согласовываться со значением, получаемым из выражения (2.24a).

Наиболее полное построение методики обработки данных опытных откачек достигается при условии нестационарного режима первоначальной откачки, которая проводится с постоянным деби-

том Q , когда понижения в наблюдательной скважине определяются уравнением (2.1).

Существует ряд предложений по способам использования уравнения (2.1) для обработки результатов откачек [31, 41]. Наиболее общим способом, применимым для обработки данных понижений уровней во всем диапазоне откачки, является способ эталонной кривой, предложенный Ч. Тейсом [10, 40]. Для обоснования этого способа прологарифмируем выражение (2.1):

$$\lg s = \lg \frac{Q}{4\pi T} + \lg W(u), \quad (2.25)$$

и выражение для безразмерного аргумента u

$$\lg \frac{1}{u} = \lg 4a + \lg \frac{t}{r^2}. \quad (2.26)$$

Из (2.25) и (2.26) видно, что значения $\lg s$, $\lg W$, а также $\lg \frac{t}{r^2}$, $\lg \frac{1}{u}$ отличаются между собой на постоянные величины (соответственно на $\lg \frac{Q}{4\pi T}$ и $\lg 4a$), откуда следует, что на те же величины оказываются сдвинутыми между собой по каждой из осей (рис. 24а) кривые зависимости $\lg W$ от $\lg \frac{1}{u}$ и $\lg s$ от $\lg \frac{t}{r^2}$. Поэтому, составив график зависимости $\lg s$ от $\lg t$ (по материалам откачки), следует наложить его на предварительно составленный эталонный график зависимости $\lg W$ от $\lg \frac{1}{u}$, добиваясь их наилучшего совпадения путем передвижения параллельно координатным осям. Снимая далее с совмещенного графика любую точку с координатами $\lg s$ и $\lg \frac{t}{r^2}$, $\lg W$ и $\lg \frac{1}{u}$, согласно (2.25) и (2.26) получим формулы для раздельного определения расчетных параметров

$$\lg \frac{Q}{4\pi T} = \lg s - \lg W; \quad (2.27)$$

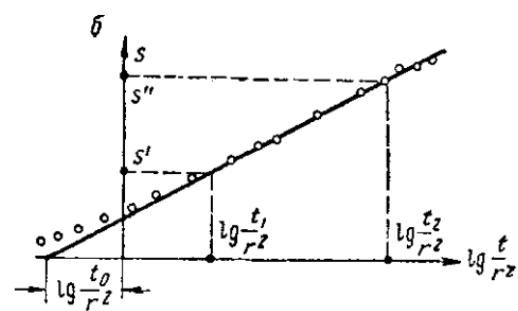
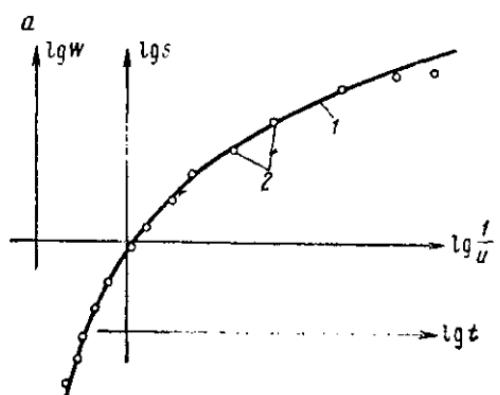


Рис. 24. Расчетный график зависимости s от t .

а — в билогарифмических координатах (расчет по способу эталонных кривых); б — в полулогарифмических координатах (расчет по способу Джекобса)

фиг зависимости $\lg s$ от $\lg t$ (по материалам откачки), следует наложить его на предварительно составленный эталонный график зависимости $\lg W$ от $\lg \frac{1}{u}$, добиваясь их наилучшего совпадения путем передвижения параллельно координатным осям. Снимая далее с совмещенного графика любую точку с координатами $\lg s$ и $\lg \frac{t}{r^2}$, $\lg W$ и $\lg \frac{1}{u}$, согласно (2.25) и (2.26) получим формулы для раздельного определения расчетных параметров

$$\lg \frac{Q}{4\pi T} = \lg s - \lg W; \quad (2.27)$$

$$\lg 4a = \lg \frac{1}{u} - \lg \frac{t}{r^2}. \quad (2.28)$$

Заметим, что при такой форме обработки графики $\lg s$ от $\lg \frac{t}{r^2}$ для данной откачки в разных наблюдательных скважинах должны совпадать, так что степень их совпадения в реальных условиях может служить критерием для проверки правильности описания процесса откачки уравнением (2.1), в частности, проверкой однородности и изолированности водоносного пласта.

Для удобства наложения график эталонной кривой строится на кальке; для его построения можно воспользоваться приведенными ниже данными

$\lg \frac{1}{u}$	-0,3	-0,15	0	0,15	0,3	0,5	0,7	1	1,3
$\lg W$	-1,31	-0,943	-0,66	-0,433	-0,254	-0,062	-0,086	0,26	0,393

При наступлении квазистационарного режима понижения уровня определяются уравнением (2.6), которое можно представить в виде

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \left(\lg 2,25a + \lg \frac{t}{r^2} \right), \quad (2.29)$$

откуда следует, что в координатах s , $\lg \frac{t}{r^2}$ график понижения уровня должен иметь прямолинейный характер. На основании такой зависимости Ч. Джекоб [12, 40] предложил наносить данные о снижении уровня в наблюдательных скважинах на график зависимости s от $\lg t$ или от $\lg \frac{t}{r^2}$ (рис. 24.6). Прямая линия на таком графике отсекает на оси $\lg \frac{t}{r^2}$ величину $\lg \frac{t_0}{r^2}$, по которой согласно (2.29) при $s = 0$ получим

$$a = \frac{r^2}{2,25t_0}, \quad (2.30)$$

а по любым значениям понижений s' и s'' , соответствующим значениям времени t_1 и t_2 , получим данные для определения проводимости по формуле

$$T = 0,183 \frac{Q}{s'' - s'} \lg \frac{t_2}{t_1}. \quad (2.31)$$

При расчетах по формуле (2.31) следует проверять правомерность использования зависимостей квазистационарного режима по условию (2.5), причем, считая допустимой погрешностью 10%, получим условие $u \ll 0,15$, и время практического наступления квазистационарного режима t_{kv} будет определяться по формуле

$$t_{kv} = \frac{r^2}{4 \cdot 0,15a} = 1,7 \frac{r^2}{a}. \quad (2.32)$$

Расчеты по периоду квазистационарного режима практически без ограничений могут использоваться при расчетах по центральной скважине, где при $r = r_c$ условие (2.5) выполняется обычно сразу же после начала откачки. В этом случае приходится только считаться с возможным влиянием сопротивления прискважинной зоны, что требует введения в расчет вместо действительного радиуса скважины r_c его расчетного значения r_c' . Поэтому расчет коэффициента пьезопроводности по формуле (2.30) оказывается уже недостоверным. Что касается использования формулы (2.31) для расчетов проводимости пласта T , то, поскольку в нее не входит радиус скважины, она остается справедливой и при наличии сопротивления прискважинной зоны. Таким образом, использование формулы (2.31) дает возможность достоверно определить проводимость пласта по данным о снижении уровня в центральной скважине и, следовательно, она может быть использована для обработки результатов одиночной откачки. Отметим только, что в этом случае необходима высокая точность задания постоянства дебита откачки во времени (колебания дебита должны быть заметно меньшими изменения величины $\lg t$). Кроме того, при такой обработке данных снижения уровня в центральной скважине необходимо увериться в слабом влиянии емкости скважины, погрешность которого определяется отношением объема воды $\omega_c s_c$, откаченной из скважины, к общему объему откаченной воды Q_t (ω_c — площадь сечения скважины).

При дебите скважины, меняющемся по линейному закону, в качестве исходного используется уравнение (2.13). В этом случае определение параметров можно проводить с использованием эталонной кривой, которая здесь представляет собой график функции $W_t(u)$, построенный в логарифмическом масштабе. Фактический материал наносится на логарифмический график с координатами $\frac{s}{Q}$ и t ($\lg \frac{s}{Q}$ от $\lg t$). Смещение оси абсцисс соответствует при этом величине $\frac{1}{4\pi T}$, а оси ординат — величине $\frac{r^2}{4a}$. В случае длительной откачки (при $t > 10^2$) для определения параметров можно использовать графоаналитический способ, строя зависимость $\frac{s}{Q}$ от $\lg t$, которая согласно выражению (2.13) должна быть прямолинейной. Проводя прямую через полученные точки и выделяя на ней любые два значения $\frac{s_1}{Q_1}$ и $\frac{s_2}{Q_2}$, соответствующие величинам $\lg t_1$ и $\lg t_2$, получим величину проводимости из выражения

$$T = 0,183 \frac{\lg t_2 - \lg t_1}{\frac{s_2}{Q_2} - \frac{s_1}{Q_1}}. \quad (2.33)$$

При изменении дебита откачки по ступенчатому закону в качестве исходного используется уравнение (2.11), более сложный характер которого существенно затрудняет методику расчетов и, в частности, исключает возможность использования способа эталонных кривых. Реально возможный способ обработки здесь может основываться только на использовании упрощенных зависимостей при квазистационарном режиме. Покажем применение этого способа на примере двухступенчатой откачки, проводимой с дебитом Q в течение времени t_1 , после чего устанавливается дебит $Q_1 = Q + \Delta Q_1$. В этом случае понижение уровня при квазистационарном режиме получится согласно (2.11) при логарифмическом представлении функций скважины в следующем виде:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25at}{r^2} + \frac{\Delta Q_1}{4\pi T} \ln \frac{2,25a(t-t_1)}{r^2} = 0,18 \frac{Q_1}{T} \left[\lg 2,25a + \right. \\ \left. + \bar{Q} \lg \frac{t}{r^2} + \Delta \bar{Q}_1 \lg \frac{(t-t_1)}{r^2} \right]; \quad \bar{Q} = \frac{Q}{Q + \Delta Q_1}; \quad \Delta \bar{Q}_1 = \frac{\Delta Q_1}{Q + \Delta Q_1}. \quad (2.34)$$

Из выражения (2.34) следует, что в этом случае должен получаться прямолинейный график зависимости понижения s от величины $\tau = \bar{Q} \lg \frac{t}{r^2} + \Delta \bar{Q}_1 \lg \frac{(t-t_1)}{r^2}$, по которому могут быть определены параметры a и T ; при пересечении этой прямой оси τ получим значение $\tau = \tau_0$, а на пересечении с осью s получим значение $s = s_0$, по которым найдем

$$\lg 2,25a = \tau_0; \quad T = 0,18 \frac{Q_1 \tau_0}{s_0}. \quad (2.35)$$

Кроме визуальной прямолинейности графика зависимости s от τ критерием наступления квазистационарного режима является условие

$$t - t_1 \geq 3 \frac{r^2}{a}, \quad (2.36)$$

исходящее из требуемой точности расчетов до 5%.

Для обработки данных групповых опытных откачек используются расчетные зависимости, построенные по принципу суперпозиции. В частности, при постоянных дебитах скважин применяется зависимость вида (2.17), расчет по которой в общем случае приходится вести подбором. Во избежание подбора следует использовать условия наступления логарифмического закона понижения уровня от действия каждой скважины, которые устанавливаются неравенством: $u_i < 0,09-0,15$. В этом случае расчет можно упростить, введя приведенное время t_n [38], определяемое по зависимости

$$\lg t_n = \chi_1 \lg (t - t_1) + \chi_2 \lg (t - t_2) + \dots + \chi_l \lg (t - t_l), \quad (2.37)$$

$$\chi_1 = \frac{Q_1}{Q}, \quad \chi_2 = \frac{Q_2}{Q}, \quad \dots, \quad \chi_l = \frac{Q_l}{Q}, \quad (2.37a)$$

где $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_l$ — суммарный дебит групповой откачки. После этого для обработки данных групповой откачки можно

воспользоваться способом Джекоба (формулы 2.30—2.31), принимая в качестве Q — суммарный дебит скважин, а в качестве t — величину приведенного времени $t_{\text{п}}$.

Заметное упрощение расчетов групповой откачки может быть достигнуто при одновременной откачке из всех центральных (эксплуатационных) скважин, когда $t_i = 0$. В этом случае при обработке результатов нестационарного режима откачки можно воспользоваться способом эталонных кривых, причем эталонные кривые должны специально строиться для данной групповой откачки. Например, зависимость (2.17) при этом можно записать в виде

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W_0(u); \quad (2.38)$$

$$W_0(u) = \chi_1 W(u \cdot r_1^2) + \chi_2 W(u \cdot r_2^2) + \dots + \chi_i W(u \cdot r_i^2), \quad (2.38a)$$

$$u = \frac{r^2}{4at}, \quad r_1 = \frac{r}{r_1}, \quad r_2 = \frac{r}{r_2}, \dots, \quad r_i = \frac{r}{r_i}, \quad (2.38b)$$

где величина r может быть выбрана любой (например, $r = r_i$ или равной среднему из r_i). Построив эталонную кривую зависимости $\lg W_0$ от $\lg \frac{1}{u}$ для каждой наблюдательной скважины (при известных r_1, r_2, \dots, r_i), можно далее вести обработку данных групповой откачки точно так же, как и для откачки из одиночной скважины.

При близком расположении центральных скважин их можно заменить «большим колодцем» с дебитом, соответствующим суммарному водоотбору [10, 38].

в. Восстановление уровня после откачки

Важным этапом опытных работ является восстановление уровня после остановки откачки, когда дебит скважины мгновенно уменьшается до нуля. При первоначальной откачке с постоянным дебитом Q график изменения дебита будет иметь одноступенчатый характер (рис. 25, а), а восстановление будет соответствовать второй ступени с нулевым дебитом. Следовательно, выражение для понижения уровня в процессе его восстановления можно получить из уравнения (2.11) при $\Delta Q_1 = Q$ и $t_1 = t_0$, т. е. в данном случае

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u_0)], \quad u = \frac{r^2}{4at}; \quad u_0 = \frac{r^2}{4a(t - t_0)}. \quad (2.39)$$

Типовой график восстановления уровня приведен на рис. 25, б. Для определения параметров по уравнению (2.39) удобно использовать либо начальный, либо конечный периоды восстановления уровня. В начальный период величина $W(u)$ изменяется значительно меньше, чем величина $W(u_0)$, так что величину $\frac{Q}{4\pi T} W(u)$ можно принимать равной значению понижения s_0 на момент остановки откачки. Тогда уравнение (2.39) представится в виде

$$s_0 - s = \Delta H = \frac{Q}{4\pi T} W(u_0), \quad u_0 = \frac{r^2}{4at}, \quad t_0 = t - t_0, \quad (2.40)$$

т. е. в этом случае выражение для повышения уровня ΔH с момента остановки откачки оказывается идентичным выражению (2.1) для понижения уровня s в процессе первоначальной откачки. Поэтому в начальный период обработку данных восстановления уровня можно вести по методике, разработанной выше для первоначальной откачки с постоянным дебитом, заменяя только s на ΔH и t на время восстановления уровня t_b , отсчитываемое от момента остановки откачки.

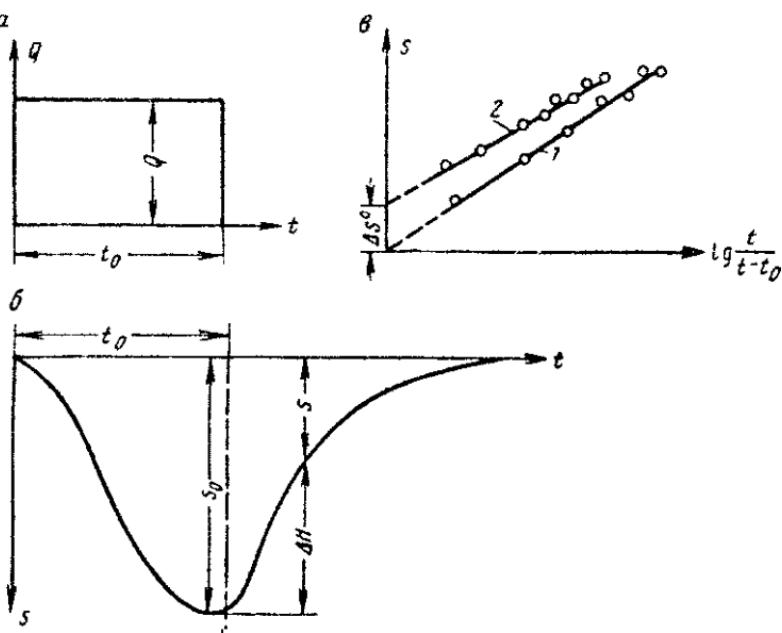


Рис. 25. Восстановления уровня после остановки откачки.

а — график расхода откачки; б — изменение уровня во времени; в — полулогарифмический график восстановления уровня. 1 и 2 — вид графика при правильном и ошибочном задании статического уровня

Начальный период восстановления уровня в центральной скважине не можно использовать для оценки расчетного радиуса скважины, характеризующего ее сопротивление. Для этого следует построить полулогарифмический график зависимости ΔH от $\lg t$ и продолжением прямой от пересечения с осью $\lg t$ найти значение $\lg t_0$, при котором $\Delta H = 0$. Поскольку в этом случае $\lg \frac{2,25at_0}{(r_c')^2} = 0$, то получим формулу для расчетного радиуса

$$r_c' = 1,5 \sqrt{at_0}. \quad (2.41)$$

Входящая в эту формулу величина a может либо определяться расчетами по наблюдательным скважинам, либо приниматься по литературным данным.

Поскольку строгое выражение повышения уровня ΔH согласно (2.39) имеет вид

$$\Delta H = s_0 - s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u^0) - W(u) + W(u_0)]; \quad u^0 = \frac{r^2}{4a t^0}, \quad (2.42)$$

то оценку относительной погрешности δ , вносимой при использовании упрощенного выражения (2.40), можно представить в виде

$$\delta = \frac{W(u^0) - W(u)}{W(u_0)}. \quad (2.43)$$

Конечный период восстановления уровня характеризуется логарифмическим законом их изменения, когда можно принять $W(u) = \ln \frac{2.25 a t}{r^2}$ и $W(u_0) = \ln \frac{2.25 a (t - t_0)}{r^2}$, так что уравнение (2.39) принимает вид

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t}{t - t_0} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t}{t - t_0}. \quad (2.44)$$

Исходя из уравнения (2.44), можно определить проводимость пласта, построив график зависимости s от $\lg \frac{t}{t - t_0}$, который должен иметь линейный характер (рис. 25, a), причем построенная таким образом прямая должна приходить в начало координат. (Последнее условие используется также для проверки правильности выбора статического уровня, хотя видимое расхождение уровней Δs^0 может быть также следствием гистерезиса разуплотнения пласта). Построив такой график, прямолинейность которого служит критерием его правильности, определяют далее проводимость согласно (2.39) по формуле

$$T = 0,183 \frac{Q}{s} = \lg \frac{t}{t - t_0}, \quad (2.45)$$

беря в качестве расчетной любую из точек построения графика.

Время восстановления уровня, начиная с которого можно считать наступление конечного периода откачки, в соответствии с условием (2.5) при допустимой погрешности расчетов 5% и $u_0 = 0,09$ определится по формуле

$$t_b = \frac{r^2}{4 \cdot 0,09 a} \approx 3 \frac{r^2}{a}. \quad (2.46)$$

При расчетах по восстановлению уровня в центральной скважине условие (2.46) выполняется обычно довольно быстро, и, следовательно, в этом случае расчет проводимости, как правило, можно вести по зависимости (2.45). Однако в начальный период характер восстановления уровня в центральной скважине может оказаться искаженным из-за влияния заполнения емкости скважины. Теоретический анализ показывает [37], что при допустимой

погрешности 5 % влияние заполнения скважин следует учитывать только при условии

$$\frac{Qt_b}{\omega_c \Delta H} \leq 20. \quad (2.47)$$

В водоносных горизонтах, водопроводимость которых мала ($T < 50 \text{ м}^2/\text{сутки}$), начальный период может быть достаточно длительным. Повышение уровня в этот период можно определить по формуле

$$\Delta H = \frac{Q}{T} F^0(c, \delta), \quad c = \frac{\mu (r_c')^2}{r_c^2}, \quad \delta = \frac{T t_b}{\omega_c}. \quad (2.48)$$

Таблицы функции $F^0(c, \delta)$ представлены в работе [27], где также рассмотрен способ определения параметров с помощью эталонной кривой. Для практических расчетов эталонные кривые можно строить расчетами $F^0(c, \delta)$ по формуле

$$F^0(c, \delta) = 0,183 \lg \frac{7,05 \delta}{c} \left[1 - \exp \left(- \frac{5,56 \delta}{\lg 7,05 \frac{\delta}{c}} \right) \right], \quad (2.49)$$

погрешность которой по сравнению с точным решением при $c < 0,1$ не превышает 10 %. При $\omega_c \simeq \pi (r_c')^2$ водопроводимость T можно оценивать по уклону прямой β' , проведенной в точке перегиба графика $\Delta H - \lg t$,

$$T = \frac{0,183 Q}{\beta'} P(\mu), \quad (2.50)$$

где $P(\mu)$ — поправка, зависящая от водоотдачи пласта. Для безнапорных горизонтов $P(\mu) = 2,5$, для напорных $P(\mu) = 5$.

Если во время восстановления уровня t_b значительно превышает время первоначальной откачки t_0 , то, представляя логарифм степенным рядом

$$\ln \frac{t}{t - t_0} = \ln \frac{t_0 - t_b}{t_0} = \frac{t_0}{t_b} - \frac{1}{2} \left(\frac{t_0}{t_b} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{t_0}{t_b} \right)^3 - \dots \quad (2.51)$$

и считая допустимой погрешность 5 %, при $t_b > 10 t_0$, можно отбросить все члены ряда, кроме первого, и привести выражение (2.45) к виду

$$s = \frac{Q}{4\pi T} - \frac{t_0}{t_b} = \frac{V}{4\pi T t_b}, \quad (2.52)$$

где $V = Qt_0$ — общий объем воды, отобранный из скважины в процессе откачки; согласно (2.52) проводимость в этом случае определяется по формуле

$$T = \frac{V}{4\pi s t_b} = 0,08 \frac{V}{s t_b}. \quad (2.53)$$

Критерием правильности формулы (2.53) может служить постоянство величины $s t_b$.

Формулу (2.53) можно применять и для обработки данных единовременного налива (экспресс-налива) в совершившую скважину объема воды V , при этом только понижение уровня s заменяется на превышение H динамического уровня относительно статического положения, а время t_b отсчитывается от момента залива воды в скважину. Более общее решение задачи для такого экспресс-налива рассмотрено, например, в работах [11, 43].

г. Рекомендации по порядку проведения и обработки опытных откачек

Для определения гидрогеологических параметров напорных водоносных пластов опытные откачки следует проводить при постоянном дебите в течение времени, обеспечивающем достаточно полное развитие квазистационарного режима в пределах опытного куста скважин.

Проверка квазистационарности режима прежде всего осуществляется построением графика зависимости s от $\lg t$, который должен иметь четко выраженный конечный прямолинейный участок.

После остановки откачки необходимо особенно тщательно отфиксировать начальный этап восстановления уровня (при $t_b < 0,1t_0$), обработка данных которого позволяет провести наиболее полное определение всех фильтрационных параметров. Обработку результатов первоначальной откачки и начального этапа восстановления уровня целесообразно обобщить, составляя совмещенный график $s(\lg t)$ и $\Delta H(\lg t_b)$, который должен оказаться практически единым. Если же восстановление уровня производится после изменения дебита, то для составления такого совмещенного графика данные восстановления уровня приводятся к дебиту первоначальной откачки Q_0 , т. е. на график $s(\lg t)$ накладывается график $\frac{Q_0}{Q} \Delta H(\lg t_b)$, где Q — дебит перед восстановлением уровня.

При вынужденной остановке откачки (например, при отключении электроэнергии) нередко целесообразнее дождаться полного восстановления уровней и только после этого продолжать откачуку, считая, что она проводится заново.

Совершенно необходимым условием достоверности данных нестационарного режима откачки является стабильность естественного режима подземных вод в процессе опытной откачки, в которой следует удостоверяться на основании данных режимных наблюдений.

Особого рассмотрения требует обоснование проведения опытных откачек при нескольких режимах (дебитах, понижениях). С точки зрения использования нестационарного режима явно целесообразно проведение опытных откачек при постоянном режиме (дебите), позволяющее наилучшим образом выявить закономерность откачки и провести обработку ее данных. Поэтому, как правило, рекомендуется проведение откачки с постоянным во времени дебитом.

Исключения из этого правила возникают только при проявлениях факторов, нарушающих линейную связь между стабилизованными понижениями уровней и дебитом Q . Эти нарушения могут быть связаны, во-первых, с гидравлической нелинейностью течения в прискважинной зоне и в самой скважине, и, во-вторых, с фильтрационными деформациями прискважинной зоны. При необходимости изучения факторов нелинейности следует проводить откачку при нескольких режимах, причем для выявления обратимости этих процессов такую откачку целесообразно проводить с «обратным ходом», т. е. сначала задавать увеличивающиеся дебиты, а затем возвращаться к меньшим дебитам. При этом гидравлические процессы должны давать обратимые результаты, а влияние деформаций прискважинной зоны должно проявиться в необратимом характере индикаторной кривой зависимости понижения от времени.

§ 3. ОТКАЧКИ В СЛОИСТЫХ ПЛАСТАХ

В слоистых пластах приток к скважине осуществляется не только за счет сработки статических запасов горизонта, в котором находится фильтр водозабора, но и за счет упругоемкости слабопроницаемых слоев, разделяющих водоносные горизонты, и перетока через них воды из соседних слоев. При длительной работе водозабора возможна сработка всех упругих запасов водоносного комплекса до нижнего водоупора. В дальнейшем снижение напоров будет связано со снижением свободной поверхности, темп которого определяется водоотдачей μ . Учитывая разнообразие природных условий, анализ откачки следует начинать с обоснования фильтрационной расчетной схемы. Решение этой задачи представляется достаточно сложным главным образом в силу того, что различные факторы могут одинаково отражаться на ходе снижения напора. Гипотеза, построенная на основе данных о строении водоносного комплекса, должна проверяться последовательным анализом отдельных этапов откачки, характеризующихся различным темпом снижения напора. Удобным для такого анализа представляются графики прослеживания, построенные в полулогарифмическом масштабе ($s - \lg t$) для различных наблюдательных скважин. Эти графики для различных схем строения водоносных горизонтов обладают рядом специфических особенностей, которые позволяют выявить основные факторы, определяющие ход откачки, и обосновать расчетную схему.

Не менее важным представляется и анализ конечных результатов расчета параметров. Сопоставление полученных значений коэффициентов упругой и гравитационной водоотдач, а также коэффициентов фильтраций водоносных горизонтов и слабопроницаемых слоев с реально возможными значениями этих параметров может подтвердить или отвергнуть принятую вначале гипотезу. Несмотря на разнообразие реальных условий, достаточно рассмотреть лишь

ряд частных схем (избегая общего случая), удовлетворяющих условиям кратковременных откачек. Вместе с тем эти схемы являются достаточно общими, и на их основе можно провести анализ откачки большей длительности.

а. Перетекание из водоносного горизонта с постоянным напором

Рассмотрим условия, когда переток происходит из водоносных горизонтов, напоры в которых остаются постоянными (рис. 26, а). В реальных условиях такая схема соответствует случаю, когда проводимость этих горизонтов значительно больше проводимости

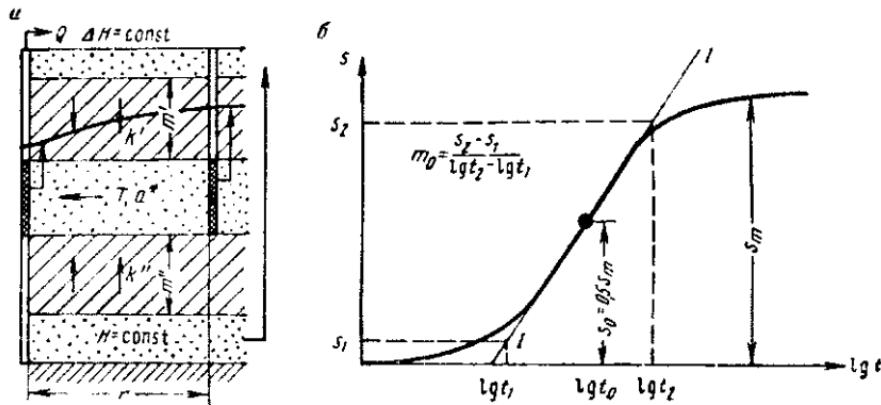


Рис. 26. Откачка при перетекании из водоносных горизонтов с постоянным напором.

а — фильтрационная схема; б — полулогарифмический график прослеживания понижения

горизонта, из которого проводится откачка, или когда режим в вышележащем горизонте определяется гравитационной водоотдачей. При этом пренебрежем упругими запасами в слабопроницаемых слоях, т. е. режим фильтрации в них будем считать жестким. Решение уравнения (1.13) при $s^0 = 0$ было получено Ч. Джекобом и М. Хантушем [28] для откачки с постоянным расходом Q в виде

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B), \quad u = \frac{r^2}{4a^* t}, \quad (3.1)$$

$$B = \sqrt{\frac{m' m'' T}{k' m'' + k'' m'}}. \quad (3.2)$$

Таблицы функции $W(u, r/B)$ представлены в приложении. Из выражения (3.1) следует, что при большой длительности откачки ($t > \frac{5B}{a^*}$) имеем:

$$W(u, r/B) \approx 2K_0(r/B), \quad (3.3)$$

где $K_0(x)$ — функция Бесселя нулевого порядка второго рода от минимого аргумента. Таблица этой функции представлена в прило-

жении. На заключительных стадиях откачки наблюдается стабилизация понижений напора в скважинах, и режим откачки становится стационарным. В этот период весь расход скважины компенсируется перетоком из соседних слоев, а дальнейшей сработки упругих запасов в горизонте не происходит. Максимальное понижение s_m , достигнутое в наблюдательных скважинах к этому периоду, определяется соотношением

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0(r/B). \quad (3.4)$$

Учитывая особенности функции $K_0(x)$ при $r/B < 0,05$, можно записать

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1,13B}{r}. \quad (3.5)$$

Таким образом, разница в понижениях в двух скважинах, например в центральной и наблюдательной, будет определяться соотношением, совпадающим с уравнением Дюпюи (см. 2.8)

$$s_{m_a} - s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_a}. \quad (3.6)$$

Особенности снижения напора в период нестационарного режима хорошо видны на графике, построенном в координатах $s - \lg t$ (рис. 26, б). Характерной особенностью графика является точка перегиба при

$$t_0 = \frac{rB}{2a^*}. \quad (3.7)$$

Уклон прямой в точке перегиба

$$m_0 = 0,183 \frac{Q}{T} e^{-r/B}. \quad (3.8)$$

Точка перегиба графика соответствует периоду, когда половина расхода скважины компенсируется перетоком из соседних горизонтов. Понижение в точке перегиба

$$s_0 = \frac{Q}{4\pi T} K_0(r/B). \quad (3.9)$$

Эти свойства полулогарифмического графика удобно использовать для определения гидрогеологических параметров. Согласно предложению М. Хантуша [28], определение параметров производится следующим образом: строят график понижения s от $\lg t$ (для этой цели удобно использовать полулогарифмический масштаб), визуально определяют точку перегиба (см. рис. 26, а). Положение этой точки можно скорректировать, исходя из условия $s_0 = 0,5 s_m$, и найти соответствующее ей значение времени t_0 . Далее в точке перегиба проводится касательная (I—I), уклон m_0 которой определяется по формуле

$$m_0 = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1},$$

где s_2 и s_1 — две любые ординаты касательной, а $\lg t_2$ и $\lg t_1$ — соответствующие им значения логарифма времени. Отношение между понижением s_0 и уклоном касательной в этой точке m_0 определяется соотношением

$$2,3 \frac{s_0}{m_0} = e^{r/B} K_0(r/B) = F(r/B). \quad (3.10)$$

Из этого соотношения величина r/B находится по таблицам функции $F(r/B)$, представленным в приложении.

Величину проводимости можно определить из выражения (3.8) для уклона кривой m_0 в точке перегиба

$$T = \frac{0,183Q}{m_0} e^{-r/B} \quad (3.11)$$

или из выражения (3.9) для понижения s_0

$$T = \frac{Q}{4\pi s_0} K_0(r/B). \quad (3.12)$$

Поскольку в точке перегиба справедливо соотношение (3.7), то зная величины, входящие в (3.7), можно определить коэффициент пьезопроводности a^* :

$$a^* = \frac{rB}{2t_0}. \quad (3.13)$$

При наличии нескольких наблюдательных скважин (больше двух) используется другой способ, также предложенный М. Хантушем [28].

Он основывается на том, что уклоны m_0 кривых ($s - \lg t$) в точке перегиба связываются с расстоянием r следующим соотношением:

$$\lg m_0 = \lg 0,183 \frac{Q}{T} - 0,43 \frac{r}{B}. \quad (3.14)$$

По полулогарифмическим графикам ($s - \lg t$) определяются уклоны кривых в точке перегиба для каждой скважины. Строится график $\lg m_0$ от r . Этот график представляет собой прямую с угловым коэффициентом α :

$$\alpha = \frac{\lg m_{02} - \lg m_{01}}{r_2 - r_1} = \frac{0,43}{B} \quad (3.15)$$

где m_{01} и m_{02} — ординаты прямой, а r_1 и r_2 — соответствующие им расстояния. Определив α , несложно вычислить фактор перетекания B :

$$B = \frac{0,43}{\alpha}.$$

Коэффициент фильтрации слабопроницаемых слоев k' и k'' можно определить, лишь предположив, что они равны, по формуле (3.2)

$$k' = k'' = \frac{m'm''T}{B^2(m' + m'')}, \quad (3.16)$$

а в том случае, когда перетекание происходит только через один слой, по формуле

$$k' = \frac{m' T}{B^2}. \quad (3.17)$$

Как это видно, графоаналитический способ применим в тех случаях, когда вся кривая понижения прослеживается во времени так четко, что на ней можно было выделить характерные точки. При этом также важно иметь данные о максимальном понижении s_m , соответствующем стационарному состоянию. В тех случаях, когда количество информации не позволяет пользоваться графоаналитическим способом, определение гидрогеологических параметров можно проводить, используя способ эталонной кривой, представляющей собой график функции $(W(u, r/B) - 1/u)$ для различных значений r/B , построенный в логарифмическом масштабе, или $\lg [W(u, r/B)]$ от $\lg 1/u$. Данные о понижении напора в наблюдательных скважинах наносятся на график с координатами s и t ($\lg s$ и $\lg t$). График строится в масштабе эталонной кривой. Оба графика совмещаются. При этом из серии кривых с различными значениями r/B важно выбрать ту кривую, которая лучше всего ложится на опытные точки. Найдя соответствующую кривую, определяют значение фактора перетекания B .

В том случае, когда имеется несколько наблюдательных скважин, находящихся на расстояниях r_1, r_2, \dots, r_n от центральной, способ эталонной кривой может быть использован с большей надежностью.

Данные о снижении напора в наблюдательных скважинах наносятся на график с координатами s и t/r^2 (значение r берется соответственно для каждой скважины). Соотношение эталонной кривой с точками графика должно происходить таким образом, чтобы удовлетворялось условие

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{(r/B)_1}{(r/B)_2}, \quad \frac{r_1}{r_3} = \frac{(r/B)_1}{(r/B)_3}, \quad \dots, \quad \frac{r_1}{r_n} = \frac{(r/B)_1}{(r/B)_n}, \quad (3.18)$$

где $(r/B)_1, (r/B)_2$ и $(r/B)_n$ — значения r/B эталонных кривых. Таким образом, значения r/B должны быть кратны расстояниям r до наблюдательных скважин. После совмещения графиков определение параметров производится сопоставлением координат фиксированной точки одного и другого графика:

$$T = \frac{Q}{4\pi s^2} W^o(u, r/B), \quad a^* = 0,25 \left(\frac{r^2}{t} \right)^o \left(\frac{1}{a} \right)^o, \quad (3.19)$$

где s^o и $(t/r^2)^o$ — координаты выбранной точки на графике с фактическим материалом, а $W^o(u, r/B)$ и $(1/u)^o$ — координаты этой же точки на оси t графика эталонной кривой.

При использовании графиков с логарифмами величин параметры определяются из соотношений

$$\lg \frac{Q}{4\pi T} = \lg s^o - \lg W^o(u, r/B); \quad (3.20)$$

$$\lg 4a^* = \lg \left(\frac{1}{a} \right)^0 - \lg (l/r^2)^0. \quad (3.21)$$

При определении параметров по одной наблюдательной скважине очень трудно выбрать эталонную кривую, наиболее соответствующую точкам графика. Более того, в некоторых случаях (при малой длительности откачки или в том случае, когда имеются данные, характеризующие только конечные стадии понижения уровня) однозначно выбрать необходимую кривую из совокупности кривых оказывается невозможным. Как показывает опыт, пользоваться этим способом можно лишь в том случае, когда снижение уровня прослежено в диапазоне времени от $t = 0,1 \frac{B^2}{a^*}$ до $t = 5 \frac{B^2}{a^*}$. В связи с последним ограничением параллельно со способом эталонной кривой целесообразно использовать графоаналитический способ, рассмотренный выше. При стационарном режиме понижение в скважинах описывается зависимостью (3.4).

Для определения проводимости T , фактора перетекания B и коэффициента разделяющего слой k' необходимо иметь данные о понижениях s_m не менее чем по двум наблюдательным скважинам (s_{m1} и s_{m2}), находящимся на расстояниях r_1 и r_2 от центральной. Величину B можно определять подбором из соотношения

$$\frac{s_{m1}}{s_{m2}} = \frac{K_0(r_1/B)}{K_0(r_2/B)} \quad (3.22)$$

или по графику (рис. 27), на котором представлена зависимость соотношения понижений s_{m1}/s_{m2} от r_1/B для различных значений r_2/r_1 . Далее уже при известном B определяется проводимость T :

$$T = \frac{Q}{2\pi s_{m1}} K_0(r_1/B). \quad (3.23)$$

При большем числе наблюдательных скважин можно пользоваться эталонной кривой, представляющей собой график функции $K_0(x)$, построенный в логарифмическом масштабе, или графиком $\lg K_0(x) - \lg(x)$ в арифметическом масштабе (таблицы функции $K_0(x)$ см. в приложении). Данные о понижении в наблюдательных скважинах наносятся на график с координатами

$$(s_m \text{ и } r) \text{ или } (\lg s_m \text{ и } \lg r).$$

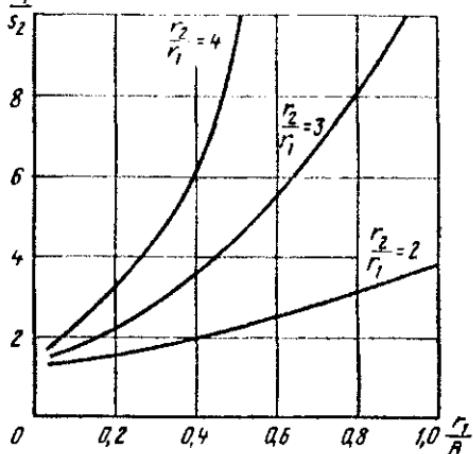


Рис. 27. График зависимости s_{m1}/s_{m2} от r_1/B для различных значений $\frac{r_2}{r_1}$

После совмещения графиков фиксируется любая точка и находятся ее координаты, затем определяются значения искомых параметров

$$T = \frac{Q}{2\pi s_m^0} K_0^0(x), \quad B = \frac{r^0}{x^0},$$

где s_m^0 и r^0 — координаты фиксированной точки на графике понижения, а x_0 и $K_0^0(x)$ — соответствующие ей координаты эталонной кривой. Для кривых $\lg s$ — $\lg r$ находятся смещения координатных осей эталонной кривой относительно осей графика с фактическим материалом:

$$\lg \frac{Q}{2\pi T} = \lg s_m^0 - \lg K_0^0(x), \quad (3.24)$$

$$\lg 1/B = \lg x^0 - \lg r^0. \quad (3.25)$$

и определяются входящие в них искомые параметры T и B . Для наблюдательных скважин, находящихся на небольших расстояниях от центральной, можно использовать соотношение (3.5). Для определения параметров строится график в координатах s_m — $\lg r$. На прямолинейной части графика (она соответствует данным, полученным по ближайшим скважинам) выбираются две любые точки с координатами $(s_{m_1}, \lg r_1)$ и $(s_{m_2}, \lg r_2)$ и определяется проводимость T :

$$T = 0,366 \frac{0(\lg r_2 - \lg r_1)}{s_{m_2} - s_{m_1}}, \quad (3.26)$$

а затем уже при известном T вычисляется значение фактора перетекания из соотношения (3.4) либо непосредственно по графику (в точке $S_m = 0$ — $B = 0,89 r$).

В качестве примера рассмотрим методику обработки данных опытной откачки, проведенной для оценки гидрогеологических параметров верхнемеловых водоносных горизонтов в Южном Приаралье. Опытные скважины вскрыли три водоносных горизонта, сложенных песчаниками. Эти горизонты отделены друг от друга пачками глин и алевролитов мощностью 10—20 м и имеют различные напоры. Откачка проводилась из скважины с расходом 240 м³/сутки из среднего водоносного горизонта мощностью 50 м. Снижение давлений в откачиваемом водоносном горизонте наблюдалось в пьезометрах, расположенных на расстояниях 250, 500, 750 и 1500 м от центральной скважины. В процессе опыта, длившегося 40 суток, были отмечены понижения давления в I и III водоносных горизонтах, причем существенные понижения порядка 10 см были отмечены в скважинах в непосредственной близости от центральной. После окончания откачки давление в скважинах восстанавливалось до статических отметок, что при значительной разнице в напорах опробуемых горизонтов свидетельствовало об отсутствии перетекания по затрубному пространству скважин в процессе откачки. Анализ данных о снижении давления в пьезометрах

показал, что для обработки результатов откачки можно принять схему «жесткого» взаимодействия водоносных горизонтов и воспользоваться для расчетов решением М. Хантуша (3.1). Последнее обусловлено еще и незначительным снижением напоров в выше-и нижележащих горизонтах.

Рассмотрим далее различные приемы обработки данных откачки как для условий неустановившегося, так и установившегося периодов фильтрации.

Графоаналитический способ при неустановившемся режиме.

Для определения параметров этим способом строится график зависимости понижения s от $\lg t$ (рис. 28, а), определяются величины максимального понижения s_m и понижения в точке перегиба s_0 , угловой коэффициент касательной m_0 в точке перегиба и время t_0 , соответствующее точке перегиба. Эти данные представлены в табл. 16. По формуле (3.10) определим величину $K_0(r/B)e^{t_0/B}$, а затем по таблице функции $F(r/B)$, значение r/B и B . По формуле (3.12), пользуясь таблицами функции $K_0(x)$, представленными в приложении, определим проводимость водоносного горизонта T , а по формуле (3.13) — коэффициент пьезопроводности a^* и величину упругой водоотдачи. Коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя k' определяется по формуле (3.16) из предположения $k' = k''$ и $m' = m''$. Ниже в табл. 16 представлены результаты расчетов.

Таблица 16
Результаты обработки данных откачек

r_m	$s_m, \text{ м}$	$s_0, \text{ м}$	$t_0, \text{ ч}$	$2.3 \frac{s_0}{m_0}$	r/B	$B, \text{ м}$	$T, \text{ м}^2/\text{сутки}$	$a^*, \text{ м}^2/\text{сутки}$	μ^*	$k', \text{ м}/\text{сутки}$
250	0,86	0,43	0,52	8,7	1,9	0,28	900	62	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
500	0,5	0,25	0,4	13,8	1,38	0,6	840	59	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$
700	0,25	0,12	0,22	33	1,25	0,8	960	89	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
1500	0,16	0,08	0,2	72	0,92	1,6	960	43	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
										$3 \cdot 10^{-4}$

Как видно, между величинами, определенными по разным скважинам, наблюдаются значительные расхождения, хотя в общем они имеют один порядок. По-видимому, достоверным следует признать параметры, определенные по двум ближним скважинам ($T = 60 \text{ м}^2/\text{сутки}$, $\mu^* = 2 \cdot 10^{-4}$, $k' = 6 \cdot 10^{-4}$, $\text{м}/\text{сутки}$), так как ошибка в измерении понижений влияет здесь на расчет в гораздо меньшей степени.

Способ эталонных кривых при неустановившемся режиме. Эталонные кривые, построенные в логарифмическом масштабе в координатах $W(u, r/B)$ и $1/t$ для различных значений параметров r/B , и опытные данные, показанные на графике с координатами s и $4t/r^2$, приведены на рис. 28, б. Совмещения эмпирически полученных точек с эталонными кривыми проводились

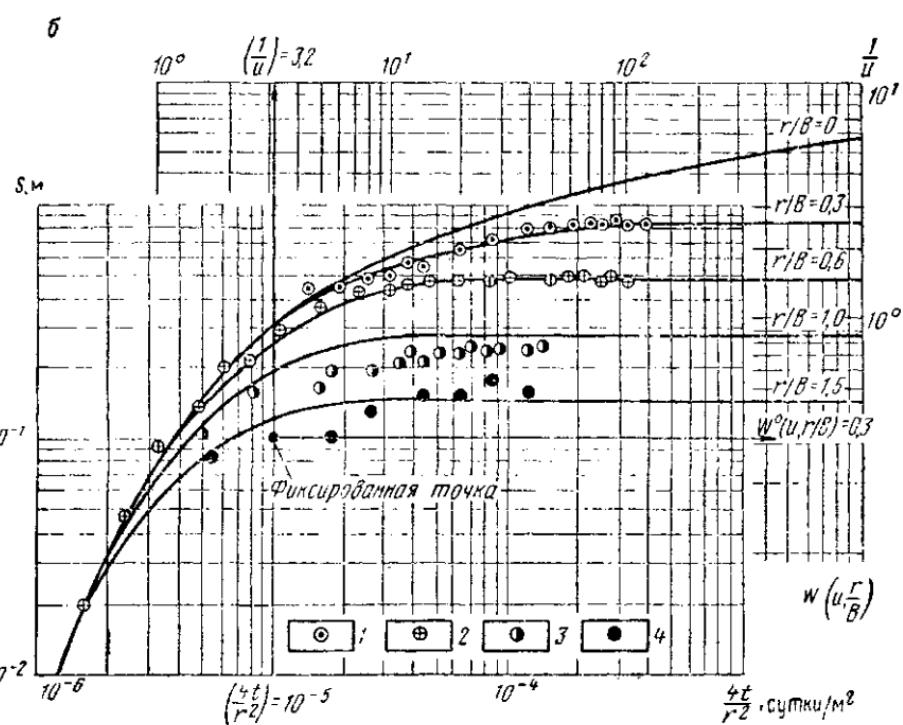
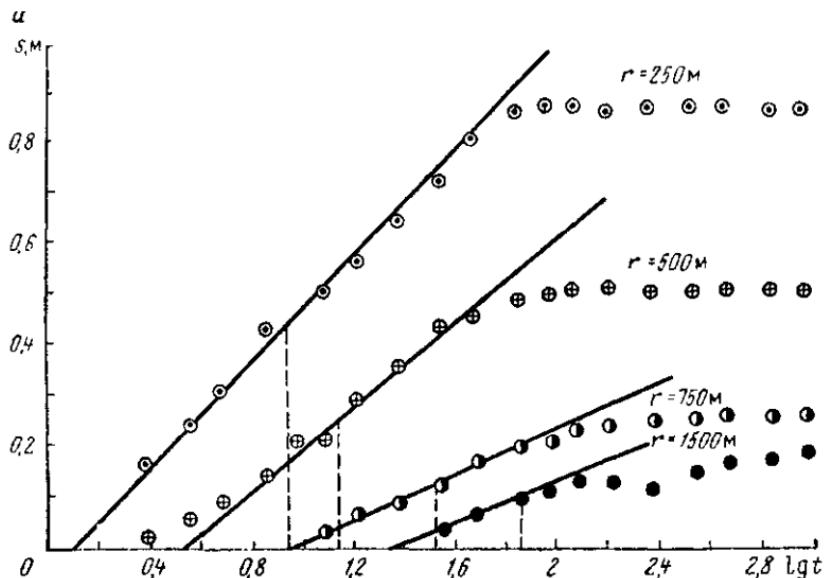


Рис. 28. Определение параметров при неустановившемся режиме перетекания.

a — полулогарифмические графики прослеживания понижения в наблюдательных скважинах; *b* — определение параметров способом эталонной кривой $1 - r = 250\text{ м}$; $2 - r = 500\text{ м}$; $3 - r = 750\text{ м}$; $4 - r = 1500\text{ м}$.

таким образом, чтобы точки, соответствующие понижению давления в наблюдательных скважинах, отстоящих от центральной на расстояниях, отличающихся в 2, 3, 4 и 6 раз, хорошо аппроксимировались теоретическими кривыми для значений r/B , отличающихся во столько же раз. Как видно, наблюдается удовлетворительное совпадение эмпирических данных с эталонными кривыми, что свидетельствует о правильном выборе расчетной схемы. Для определения параметров на графике с эмпирическими данными выбирается любая точка, например, с координатами $s^o = 0,1$ м $(4t/r^2)^o = 10^{-5}$ сутки/м². На графике с эталонной кривой ей соответствует точка с координатами $W(u, r/B)^o = 0,3$ и $(1/u)^o = 3,2$. Проводимость водоносного горизонта определяется из соотношения (3.19)

$$T = \frac{Q}{4\pi s^o} W^o(u, r/B) = \frac{240 \cdot 0,3}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1} \approx 60 \text{ м}^2/\text{сутки.}$$

Далее определяем коэффициент пьезопроводности по формуле (3.19 б):

$$a = \frac{(1/u)^o}{(4t/r^2)^o} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{сутки.}$$

Соответственно при мощности $m = 50$ м коэффициент опробуемого горизонта $k = 1$ м/сутки и коэффициент упругой водоотдачи $\mu^* = 2 \cdot 10^{-4}$. Точки, соответствующие понижениям в скважинах на расстояниях 250, 500, 750 и 1500 м, ложатся на кривые со значениями параметра $r/B = 0,3; 0,6; 1,2$ и $1,6$ соответственно (см. рис. 28). Таким образом, коэффициент перетекания $B = 840$ м. Далее, принимая, как и ранее $k' = k''$ и $m' = m'' = 15$ м, определим среднюю величину коэффициента фильтрации разделяющего слоя.

$$k' = \frac{Tm'}{2B^2} = \frac{60 \cdot 15}{2 \cdot 7 \cdot 10^5} \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ м/сутки.}$$

Способ эталонных кривых при установившемся режиме. В данном случае эталонная кривая, представляющая собой график функции $K_0(x)$, построенный в логарифмическом масштабе, совмещается с опытными точками, отложенными в координатах s_m и r в том же масштабе, что и эталонная кривая (рис. 29, а). На графике выбирается произвольная точка, например, точка с координатами $K_0^o(x) = 1$, $x_0 = 1$ на графике с эталонной кривой и координатами $S_m = 0,5$ м, $r^o = 980$ м на графике с опытными данными. Значение проводимости и фактора перетекания определяется согласно зависимости (3. 23а) и (3. 23 б)

$$T = \frac{Q}{2\pi s^o} = \frac{240}{6,28 \cdot 0,5} = 77 \text{ м}^2/\text{сутки,}$$

$$B = r = 980 \text{ м.}$$

Соответствующую этим значениям параметров величину коэффициента фильтрации слабопроницаемого слоя k' определим по формуле (3.16) $k' = 6 \cdot 10^{-4}$ м/сутки. Следует отметить, что

совмещение эталонной кривой с опытными точками в данном случае (особенно при небольшом количестве наблюдательных скважин) не может быть однозначным, что в конечном итоге влияет на величины определяемых параметров.

Графоаналитический способ при установившемся режиме. Этот способ позволяет определить параметры путем анализа зависимости графика понижения s_m от логарифма расстояния $\lg r$ (рис. 29, б). При проведении прямой через точки

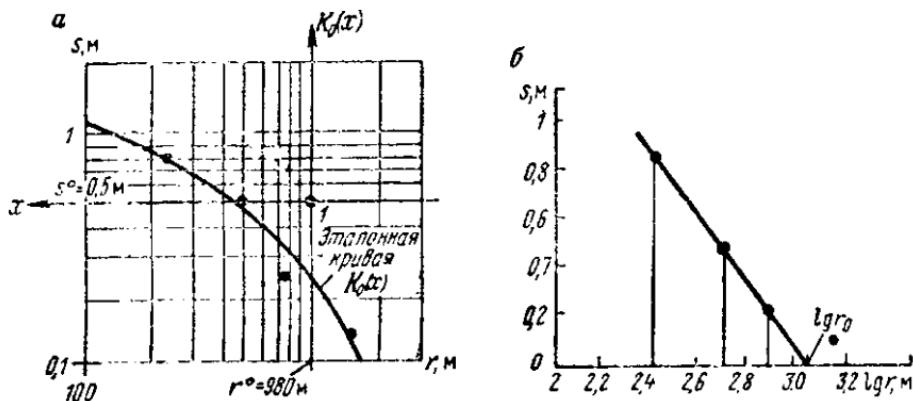


Рис. 29. Определение параметров при установившемся режиме перетекания.
а — способом эталонной кривой; б — графоаналитическим способом

следует учитывать, что логарифмическая зависимость справедлива в данном случае лишь для ближайших наблюдательных скважин (угловой коэффициент прямой в данном случае $s'(\lg r) = 1,4$ м). Величину проводимости водоносного горизонта T определим по формуле (3.26)

$$T = \frac{0.366Q}{s'(\lg r)} = \frac{0.36 \cdot 240}{1,4} = 62 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Величина фактора перетекания B определяется продолжением прямой до пересечения ее осью r . В точке пересечения $B = 0,89 r^0$. Так, в рассматриваемом случае $r^0 = 1100$ м, $B = 970$ м, а $k' = 5 \cdot 10^{-4}$ м/сутки. Как видно, параметры, определенные различными способами, находятся в полном соответствии друг с другом.

б. Перетекание из водоносного горизонта с изменяющимся напором

В том случае, когда проводимости двух водоносных горизонтов соизмеримы, предпосылка о неизменности напора в горизонтах, из которых происходит переток, становится неприемлемой. Рассмотрим условия перетока только из одного горизонта, т. е., когда в подошве первого и кровле второго водоносных горизонтов имеются водоупоры (рис. 30, а). Решение для случая, когда величи-

ны коэффициентов пьезопроводности в двух горизонтах равны, получены Ф. М. Бочевером [8]. Это соответствует условию, когда равны коэффициенты фильтрации и коэффициенты упругоемкости в обоих горизонтах ($k_1 = k_2$, $\eta_1 = \eta_2$), а разница в проводимостях определяется только разницей в мощностях горизонтов. При откачке с постоянным расходом понижения s_1 (в горизонте, из которого производится откачка) и s_2 (в соседнем горизонте) определяются по формулам

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + \delta W(u, r/B)], \quad (3.27)$$

$$s_2 = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u, r/B)], \quad (3.28)$$

$$T = T_1 + T_2, \quad B = \sqrt{\frac{T_2 m'}{k' (1 + \delta)}}, \quad \delta = \frac{T_2}{T_1}, \quad (3.29)$$

a

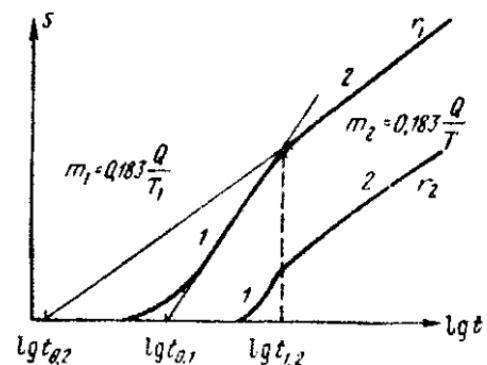
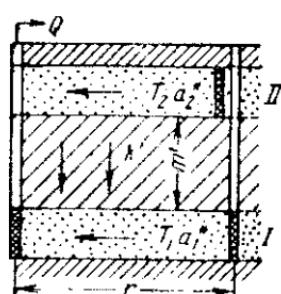


Рис. 30. Перетекание в двухпластовой системе.
a — фильтрационная схема; *б* — график снижения напора

где T_1 и T_2 — проводимости первого и второго водоносных горизонтов. Из анализа (3.27) и (3.28) следует, что в начале откачки (при больших u) влияние ее в соседнем горизонте наблюдаться не будет ($s_2 = 0$), а ход снижения напора в первом горизонте будет следовать уравнению Тейса:

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T_1} W(u). \quad (3.30)$$

При $t > 2,5 r^2/a$ понижение можно определить по формуле

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T_1} \ln \frac{2,25 a^2 t}{r^2}. \quad (3.31)$$

С другой стороны, когда процесс перераспределения давления в обоих слоях закончится, наступит период квазистационарного режима. В этот период понижения в обоих горизонтах могут быть определены по формулам

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2,25 a^2 t}{r^2} + 2\delta K_0(r/B) \right]; \quad (3.32)$$

$$s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2.25a^*t}{r^2} - 2K_0(r/B) \right]. \quad (3.33)$$

Из (3.32) следует, что ход снижения напора будет определяться суммарной проводимостью горизонтов T . Таким образом, график зависимости s от $\lg t$ будет иметь два прямолинейных участка — 1 и 2 (рис. 30, б); первый участок будет иметь уклон

$$m_1 = 0.183 \frac{Q}{T_1}, \quad (3.34)$$

уклон второго участка

$$m_2 = 0.183 \frac{Q}{T}. \quad (3.35)$$

В точке сопряжения этих прямолинейных участков должно выполниться равенство

$$\ln \frac{2.25a^*t}{r^2} = 2K_0(r/B). \quad (3.36)$$

Как видно, время соответствующее точке сопряжения $t_{1,2}$, в общем случае будет зависеть от расстояния

$$t_{1,2} = \frac{r^2}{2.25a^*} \exp [2K_0(r/B)]. \quad (3.37)$$

Однако для ближайших скважин $r/B < 0.1$, $t_{1,2}$ не зависит от расстояния ($t_{1,2} = 0.55 \frac{B^2}{a^*}$). Для определения гидрогеологических параметров удобным в данном случае представляется графоаналитический способ, для которого используется график понижения уровня в наблюдательной скважине в координатах s и $\lg t$. На этом графике находятся два прямолинейных участка и определяются их угловые коэффициенты m_1 и m_2 . По формулам (3.34) и (3.35) определяются значения T_1 и T , а затем и T_2 . Продолжив первую прямую до пересечения с осью $\lg t$, определим $t_{0,1}$, и по формуле (2.30) найдем значение a^* . Продолжив вторую прямую до пересечения с осью $\lg t$, определим новое значение времени $t_{0,2}$. Далее из равенства

$$K_0(r/B) = \frac{1.15}{\delta} \lg \frac{r^2}{2.25a^*t_{0,2}} = \frac{1.15}{\delta} \lg \frac{t_{0,1}}{t_{0,2}} \quad (3.38)$$

находим значение r/B по таблицам функции $K_0(x)$. Для ближайших наблюдательных скважин при ($r/B < 0.1$)

$$B \approx 0.89(t_{0,1}/t_{0,2})^{1/2\delta}. \quad (3.38a)$$

Коэффициент фильтрации k' определяется затем по формуле

$$k' = \frac{T_2 m'}{(1 + \delta) B^2}. \quad (3.39)$$

Если во втором горизонте на тех же расстояниях имеются наблюдательные скважины, методика обработки данных откачки может

быть изменена. Рассматривая разницу в понижениях в первом и втором горизонтах

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi T_1} W(u, r/B), \quad (3.40)$$

можно видеть, что зависимость (3.40) аналогична формуле (3.1) для условий перетекания с неизменным напором в соседних слоях. В связи с этим обработка данных откачки может проводиться по методике, рассмотренной выше в разделе 3 (а). В данном случае вместо понижения в нижнем слое следует рассматривать разницу в понижениях в первом и втором водоносных горизонтах Δs .

В том случае, когда фильтр центральной скважины установлен в двух горизонтах, применимо решение Попадопулоса [42], полученное для непроницаемого разделяющего слоя. Анализ этого решения показывает, что практически во всех случаях в напорных горизонтах снижение напора в пласте с большей проводимостью следует зависимости Тейса (2.1) и определяется суммарной проводимостью T и коэффициентом пьезопроводности того слоя, в котором установлен фильтр пьезометра. Расходы Q_1 и Q_2 , поступающие в скважину из водоносных горизонтов (при квазистационарном режиме), пропорциональны их проводимостям: $\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$. Учитывая это обстоятельство, для определения проводимости T_1 и T_2 необходимо применять расходометрию центральной скважины в процессе откачки (см. гл. III, § 3). Определив суммарную проводимость T обычным образом (§ 2), найдем значение T_1 и T_2 по формулам

$$T_1 = \frac{Q_1 T}{Q_1 + Q_2}, \quad T_2 = T - T_1,$$

где Q_1 и Q_2 определяются по материалам расходометрии.

в. Откачка при упругом режиме в слабопроницаемых слоях

В рассмотренных выше схемах исключалось влияние упругих запасов в слабопроницаемых слоях. Реально эта предпосылка может оказаться справедливой, когда перетекание происходит по системе трещин, упругим запасом воды в которых можно пренебречь. Однако при значительной сжимаемости пород разделяющих слоев упругий режим в них оказывает значительное влияние на откачку. Для анализа этого процесса рассмотрим откачку из водоносного горизонта, заключенного в слабопроницаемых породах, имеющих неограниченную мощность. Решение для понижения в водоносном горизонте при постоянном расходе скважины получено М. Хантушем [30]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W^*(u, r/\beta), \quad (3.41)$$

$$1/\beta = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{k' \eta'}{T_{\mu^*}}} + \sqrt{\frac{k'' \eta''}{T_{\mu^*}}} \right), \quad \beta = \frac{4 \sqrt{T_{\mu^*}}}{(\sqrt{\eta' k'} + \sqrt{\eta'' k''})}, \quad (3.42)$$

где $W^*(x, y)$ — функция, представленная в приложении; η' и η'' — коэффициенты упругости слабопроницаемых слоев. При малых периодах времени, когда влияние откачки еще не охватило в значительной степени слабопроницаемый слой $W^*(u, r/B) \approx W(u)$, и понижение в водоносном горизонте будет определяться по формуле Тейса (2.1). В некоторых случаях при слабой проницаемости разделяющего слоя на этой стадии можно наблюдать и квазистационарный режим, в период которого понижение происходит по логарифмическому закону (2.6).

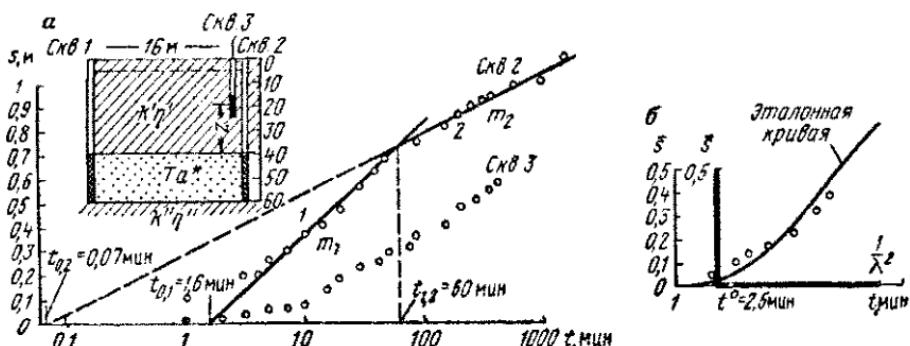


Рис. 31. Откачка при упругом режиме в слабопроницаемых слоях неограниченной мощности.

а — график прослеживания понижения в водоносном горизонте и схема куста скважин;
б — определение коэффициента α' способом эталонной кривой

При больших периодах времени ($t > 10^4 \frac{r^4}{a^2 \beta^2}$)

$$W^*(u, r/\beta) \approx \frac{1}{2} \ln \frac{0.044 \beta^2}{u r^2} \quad (3.43)$$

понижение в водоносном горизонте будет определяться по формуле

$$s = \frac{0.0915 Q}{T} \lg \frac{0.176 a^2 t^2}{r^4}. \quad (3.44)$$

Как видно, в данном случае также наблюдается логарифмическая зависимость понижения от времени. Таким образом, на полулогарифмическом графике ($s - \lg t$) будут четко видны два прямолинейных участка 1 и 2 (рис. 31, а). Причем уклон второго участка будет в два раза меньше уклона первого. Точка сопряжения двух прямолинейных участков соответствует времени

$$t_{1,2} = 0.035 \frac{\beta^2}{a^2} \quad (3.45)$$

и не зависит от расстояния. Таким образом, изменение темпа снижения напора и соответственно наклона кривой ($s - \lg t$) во всех наблюдательных скважинах должно происходить одновременно,

независимо от расстояния, что отличает рассматриваемую схему от двухпластовой. Свойства полулогарифмических графиков можно использовать для определения гидрогеологических параметров. По первому прямолинейному участку графика обычным образом (§ 2, раздел «б») определяются проводимость водоносного горизонта T и его пьезопроводность a^* . Затем, продолжая второй прямолинейный участок до пересечения с осью $\lg t$, найдем значение $t_{0,2}$, при котором $s = 0$ (см. рис. 31, а). Значение β далее определим по формуле

$$\beta = \frac{2,38r^2}{\sqrt{a^* t_{0,2}}} = 3,56r \sqrt{\frac{t_{0,1}}{t_{0,2}}}, \quad (3.46)$$

где $t_{0,1}$ — время, соответствующее пересечению участка 1 с осью $\lg t$. Если первый участок графика выражен недостаточно, величину проводимости T можно определить по формуле

$$T = \frac{0,0915Q}{m_2}, \quad (3.47)$$

где m_2 — угловой коэффициент второго прямолинейного участка. В некоторых случаях, в частности, когда не выполняется условие (3.43), для обработки данных откачки можно использовать эталонные кривые. Эталонные кривые представляют собой график функции $W^*(u, r/\beta)$ от $1/u$ для различных значений r/β , построенный в логарифмическом масштабе. Для анализа лучше всего использовать результаты по нескольким наблюдательным скважинам, расположенным на различных расстояниях от центральной. Данные о понижении в них наносятся на график с координатами $s = t/r^2$. Совмещение кривых — опытных и эталонных — производится таким образом, чтобы кривые, соответствующие различным скважинам, ложились на кривые со значениями r/β — кратными расстояниям до этих скважин, т. е. соблюдаются условия, рассмотренные выше при обработке откачки в условиях «жесткого» режима. Определив таким образом значения r/β , находим значения β . Далее, выбрав любую фиксированную точку с координатами $s^0 (t/r^2)^0$ на графике фактического материала и $W^*(u, r/\beta)$, $(1/u)^0$ на графике эталонных кривых, определяем искомые значения параметров T и a :

$$T = \frac{Q}{4\pi s^0} W^*(u, r/\beta), \quad (3.48)$$

$$a = \frac{1}{4} \left(\frac{r^2}{t} \right)^0 \left(\frac{1}{u} \right)^0. \quad (3.49)$$

Для достоверного определения параметров слабопроницаемых слоев необходимо иметь данные об изменении напоров s' в разделяющих слоях. Эти данные можно получить по пьезометрам, фильтр которых установлен на расстоянии z (5—10 м) от кровли водоносного горизонта над фильтром наблюдательной скважины

в водоносном горизонте (рис. 32, а). Понижение s' можно определить по формуле

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W^*(u, r/\beta, \bar{z}); \quad W(u, r/\beta, \bar{z}) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{u}(r/\beta + \bar{z})}{\sqrt{y(y-u)}} dy, \quad (3.50)$$

где

$$\bar{z} = \frac{z}{r} \sqrt{\frac{a^*}{a'}}, \quad a' = \frac{k'}{r'}$$

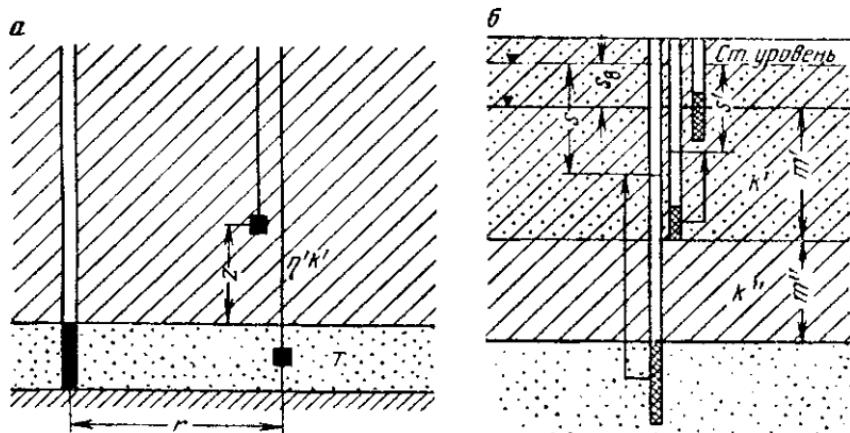


Рис. 32. Схема расположения пьезометров в покровном слое.
а - в однородном; б - в неоднородном

Анализ зависимостей (3.41) и (3.50) показывает, что соотношение понижений в водоносном горизонте и в слабопроницаемом слое практически не зависит от \bar{z} и определяется по формуле

$$s = \frac{s'}{s} = \operatorname{erfc}(\lambda); \quad \lambda = \frac{0.8z}{\sqrt{a't}}, \quad (3.51)$$

где $\operatorname{erfc}(\lambda)$ — функция, приведенная в приложении. Для определения коэффициента пьезопроводности a' удобнее всего пользоваться эталонной кривой, представляющей собой график функции $\operatorname{erfc}(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2}$, построенный в логарифмическом масштабе, либо график $\lg \operatorname{erfc}(\lambda) = \lg \frac{1}{\lambda^2}$, построенный в арифметическом масштабе. После совмещения этого графика ($s - t$) или ($\lg s - \lg t$) с эталонной кривой выбирают любую фиксированную точку и определяют ее координаты как на одном, так и на другом графике и определяют значение a' :

$$a' = \left(\frac{1}{\lambda^2} \right)^0 0,64 \frac{z^2}{t^0}, \quad (3.52)$$

где $(1/\lambda^2)^0$ — абсцисса точки на эталонной кривой, а t^0 — на кривой фактического материала. Таким же образом определяется коэффициент пьезопроводности a'' по снижению напора s'' во втором горизонте.

Определить коэффициенты фильтрации в разделяющих слоях k' и k'' в отдельности можно, считая справедливым соотношение

$$\frac{k'}{a'} = \frac{k''}{a''}. \quad (3.53)$$

В этом случае из соотношения (3.42) получим

$$k' = \frac{4}{8/T \sqrt{\frac{a''}{a'} \left(1 + \sqrt{\frac{a''}{a'}} \right)}}, \quad k'' = k' \frac{a''}{a'}. \quad (3.54)$$

С другой стороны можно предположить, что $k' = k''$ (в большинстве случаев это предположение вполне допустимо), тогда из (3.42), зная входящие в это соотношение величины, находим среднее значение коэффициента фильтрации разделяющего слоя. Следует отметить, что поскольку в реальных условиях схема с неограниченной мощностью слабопроницаемого слоя является условной, пользоваться рассмотренными выше соотношениями можно до тех пор, пока влияние откачки не достигло границ слабопроницаемого слоя ($t < \frac{m'^2}{a'}$).

Такими границами могут быть либо водоупор, либо водонесущий горизонт. Если слабопроницаемые слои ограничены водоупорами (рис. 33, a), на графике прослеживания ($s - \lg t$) будет наблюдаться увеличение темпа снижения напора до нового квазистационарного состояния, для которого характерен третий прямолинейный участок графика (см. рис. 33, a). Снижение напора в этот период (при $t > 2 \frac{m'^2}{a'}, \quad t > 2 \frac{m''^2}{a''}$) описывается зависимостью Тейса (30)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u^0), \quad (3.55)$$

$$\text{где } u^0 = \frac{r^2}{4a^0 t}; \quad a^0 = \frac{T}{\mu + \mu' + \mu''}.$$

Угловой коэффициент третьего участка $m_3 = m_1$. Точка сопряжения второго и третьего участков соответствует времени $t_{2,3}$

$$t_{2,3} = 0,035 \frac{\beta^2}{a^0}$$

и так же, как и $t_{1,2}$, не зависит от расстояния. Гидрогеологические параметры T и a^0 определяются по третьему периоду понижения методом Джекоба

$$T = \frac{0,183Q}{m_3}, \quad a^0 = \frac{r^2}{2,25t_{2,3}}.$$

Зная величину a^0 и μ^* , можно определить коэффициенты водоотдачи слабопроницаемых слоев

$$\mu' + \mu'' = \frac{T}{a^0} - \mu.$$

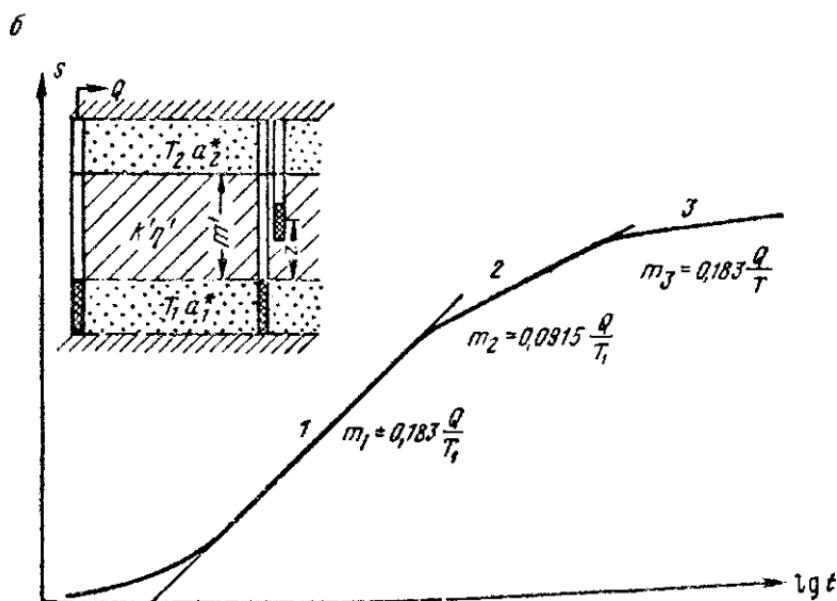
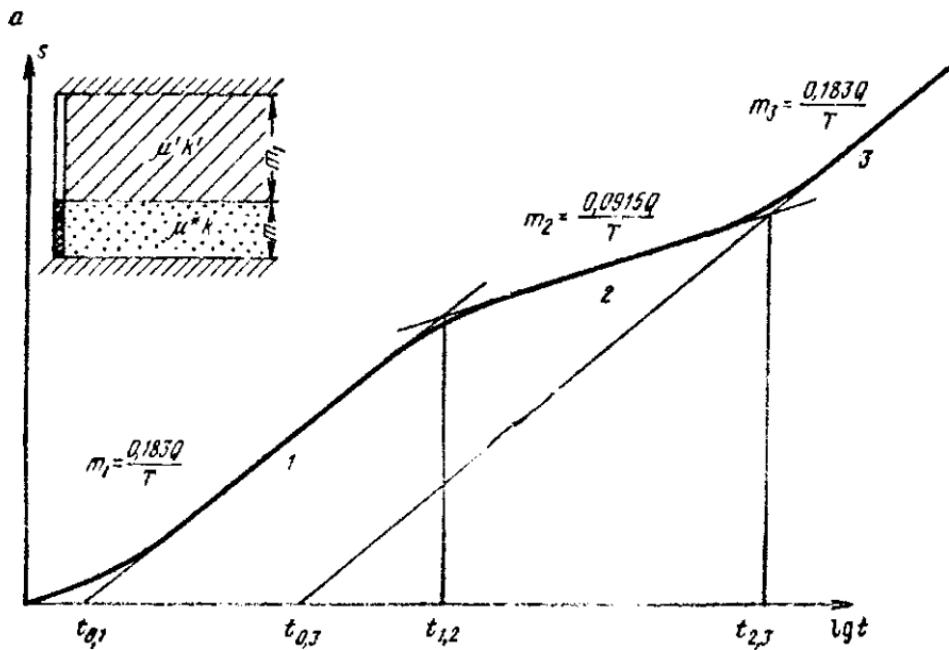


Рис. 33. Откачка при упругом режиме в слабопроницаемых слоях ограниченной мощности.
a — при наличии водоупоров; *b* — в двухпластовой системе

Полагая далее, что коэффициенты упругоемкости равны ($\eta' = \eta''$), получим

$$\eta' = \eta'' = \frac{\mu' + \mu''}{m' + m''}. \quad (3.56)$$

Для определения коэффициентов упругоемкости в каждом слое необходимо иметь наблюдательные пьезометры в разделяющих слоях. Обработка данных, полученных по этим пьезометрам, проводится с использованием зависимостей, применяемых для решения обратных одномерных задач в пласте, ограниченном на расстоянии m' непроницаемой границей [10, 32].

При откачке в двухпластовой системе, рассмотренной в разделе «б», формулу (3.43) можно использовать лишь на начальных стадиях откачки, пока влияние ее не достигнет второго горизонта.

В дальнейшем, когда начинается перетекание из соседних слоев (при $t > 5 \frac{m'^2}{a'}$), для определения понижения можно применить выражение (3.27). При этом пьезопроводность нижнего слоя можно рассчитать с учетом упругоемкости слабопроницаемого слоя

$$a^0 = \frac{T}{\mu^* + \mu'}.$$

Для оценки параметров в данном случае применимы способы, изложенные выше для «жесткого» режима фильтрации, рассмотренные в разделе «б». При длительной откачке в период, когда взаимодействие горизонтов становится квазистационарным, понижение напора в водоносном горизонте будет соответствовать зависимости (3.32). Этому периоду на графике $s - \lg t$ (рис. 33, б) будет соответствовать третий прямолинейный участок, угловой коэффициент которого m_3 определяется суммарной проводимостью обоих горизонтов. Если проводимость второго горизонта будет на порядок превышать проводимость горизонта, из которого производится откачка ($b > 10$), в конечном итоге будет наблюдаться практическая стабилизация понижения. Рассматриваемая схема в данном случае будет соответствовать условиям, когда напор во втором горизонте можно считать практически постоянным и применить для обработки откачки приемы, изложенные в разделе «а». Параметры слабопроницаемого разделяющего слоя можно определить по данным изменения напора в пьезометре, установленном в этом слое способом эталонной кривой. Для построения эталонной кривой можно использовать график функции подпора в одномерном потоке $F(z, \tilde{t})$, на одной из границ которого в водоносном горизонте напор изменяется мгновенно на величину S_u , а на другой (на расстоянии m') остается неизменным. Понижение в пьезометре, фильтр которого находится на высоте z над кровлей водоносного горизонта, можно определить по формуле [17]

$$s_z = s_u F(\bar{m}, \tilde{t}), \quad \bar{m} = \frac{z}{m'}, \quad \tilde{t} = \frac{a't}{m'^2}. \quad (3.57)$$

Графики функции $F(\bar{m} \bar{t})$ представлены в работе [17]. В табл. 17 даны значения функции $F(\bar{m} \bar{t})$, которые могут быть использованы для построения эталонной кривой для скважин с фильтрами, установленными в середине слабопроницаемого слоя ($m = 0,5$) и на расстоянии $0,25 m'$ от его подошвы.

Таблица 17

Значения функции $F(\bar{m} \bar{t})$

\bar{m}	\bar{t}	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1
0,25		0,08	0,01	0,31	0,43	0,5	0,58	0,69	0,72	0,74	0,75	0,75
0,5	0	0	0,3	0,11	0,18	0,27	0,41	0,47	0,49	0,50	0,5	

Эталонная кривая в данном случае представляет собой график функции $F(\bar{m} \bar{t})$ от \bar{t} в логарифмическом масштабе.

При анализе данных снижения напоров в пьезометре, установленном в слабопроницаемом слое, следует учитывать его инерционность, проявляющуюся в отставании понижения в пьезометре s_n от понижения s . Таким образом, для определения понижения s , в показания пьезометра следует ввести поправку $(s = s_n + \theta \frac{ds_n}{dt})$. Предварительно величину θ , которую можно назвать коэффициентом инерционности, можно определить по данным налива в пьезометр. Строя график $\lg \frac{s_n^0}{s_n}$ от t (где s_n^0 — начальный столб воды после налива), определим его угловой коэффициент $m = 1/\theta$. (Подробнее обработка данных экспресс-налива в несовершенную скважину рассмотрена в § 4). Приближенную оценку θ можно провести по формуле

$$\theta = \frac{2k'l}{r_n^2 \ln \frac{0,7l}{r_n}} \quad (3.58)$$

где l — длина фильтра пьезометра. Коэффициент фильтрации k' здесь задается с учетом гидрогеологических условий.

Пример. Откачка проводилась из водоносного горизонта, сложенного песками с галькой, с дебитом $Q = 780 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Водоносный горизонт залегает на глубине 35 м и перекрыт сверху толщей супесей и суглинков. Свободная поверхность подземных вод находится на глубине 7 м (см. рис. 31, a). Наблюдения за снижением напоров проводились в водоносном горизонте (скв. 2) на расстоянии 16 м и в толще суглинков в пьезометре 3, фильтр которого установлен на 18 м от крошки водоносного горизонта. На рис. 31, a показан ход снижения напоров в скв. 2 и 3 в полулогарифмическом масштабе. На графике ($s - \lg t$) в скв. 2 можно выделить два прямолинейных участка, уклоны которых различны. Проведя через точки наблюдения прямые 1 и 2, определим их уклоны $m_1 = 0,46 \text{ м}$ и $m_2 = 0,24 \text{ м}$. Проводимость водоносного горизонта можно определить по формуле (2.6) или (3.47)

$$T = \frac{0,183 \cdot 780}{0,46} = 310;$$

$$T = \frac{0,0915 \cdot 780}{0,24} = 300.$$

Значения проводимости, определенные по двум участкам, как видно, практически совпадают. Продолжая прямые до пересечения с осью $\lg t$, определяем $t_{0,1} = 1,6$ мин и $t_{0,2} = 0,07$ мин. Находим также время, соответствующее точке сопряжения двух прямолинейных отрезков, $t_{1,2} = 60$ мин. По формуле (2.30) определяем значение a^* и μ^* :

$$a^* = \frac{256 \cdot 1440}{2,25 \cdot 1,6} \cong 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$\mu^* = 300/10^5 = 3 \cdot 10^{-3}.$$

Далее по формулам (3.45) и (3.46) определим величину β :

$$\beta = \sqrt{\frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 60}{0,035 \cdot 1440}} = 260 \text{ м};$$

$$\beta = 3,56 \cdot 16 \sqrt{\frac{1,6}{0,07}} = 250 \text{ м}.$$

Значения β , определенные двумя различными способами, также оказались близки-ми. Принимая $\beta = 260$ м, определим $k'\eta'$ по формуле (3.42), считая $\eta'k' = \eta''k''_1$

$$k'\eta' = \frac{310 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 6,8 \cdot 10^4} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{сутки}}.$$

Чтобы определить раздельно k' и η' , необходимо воспользоваться данными о снижении напора в пьезометре 3. Перед откачкой в пьезометр был произведен налив воды, по данным которого определен коэффициент его инерционности $b = 2 \cdot 10^{-3}$ сутки. Таким образом, поправку в показания пьезометра следует вводить при скорости снижения уровня в нем, превышающей 1 м/сутки (в этом случае она будет превышать 1 см — точность замера уровня хлопушкой).

Рассматривая пьезометр как несовершенную скважину, по формуле (4.2) можно определить $k' \approx 1$ м/сутки. Введение поправки, как видно, имеет смысл лишь для первых 5 мин снижения напора, когда величина ее всего лишь 3 см и соизмерима с величиной понижения. После введения поправок в понижения пьезометра 3 строим график соотношения понижения s в пьезометре 3, к понижениям в пьезометре 2 на каждый момент времени от $\lg t$ (см. рис. 31, б). На него на-

кладываем эталонную кривую, являющуюся графиком функции $egfc(\lambda)$ от $\frac{1}{\lambda^2}$ в полулогарифмическом масштабе. Находим точки $\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)^0 = 1$ и $t_0 = 2,5$ мин. По формуле (3.52) определяем коэффициент пьезопроводности a' , считая $z = 18$ м

$$a' = 0,64 \frac{324 \cdot 1440}{2,5} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Далее находим коэффициент упругоемкости η'

$$\eta' = \sqrt{\frac{k'\eta'}{a'}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^5}} \cong 2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\mu}$$

и коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя

$$k' = \frac{k'\eta'}{\eta'} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-5}} = 2,5 \text{ м/сутки}.$$

Как видно, коэффициент фильтрации, определенный таким образом, имеет тот же порядок, что и коэффициент фильтрации, определенный по данным налива в скв. 3. Полученное расхождение можно объяснить как ошибками при определении k' по данным экспресс-налива, так и низкой точностью расчетов по рассмотренной выше схеме. В данном случае через некоторое время на величине понижения в пьезометре 3 начинает сказываться влияние свободной поверхности. Поэтому при определении a' способом эталонной кривой рассматривался только начальный период снижения.

г. Откачка в двухслойном пласте

Двухслойная система строения является достаточно типичной для верхней части водонасыщенной толщи. Особенностью этой схемы является то, что свободная поверхность подземных вод

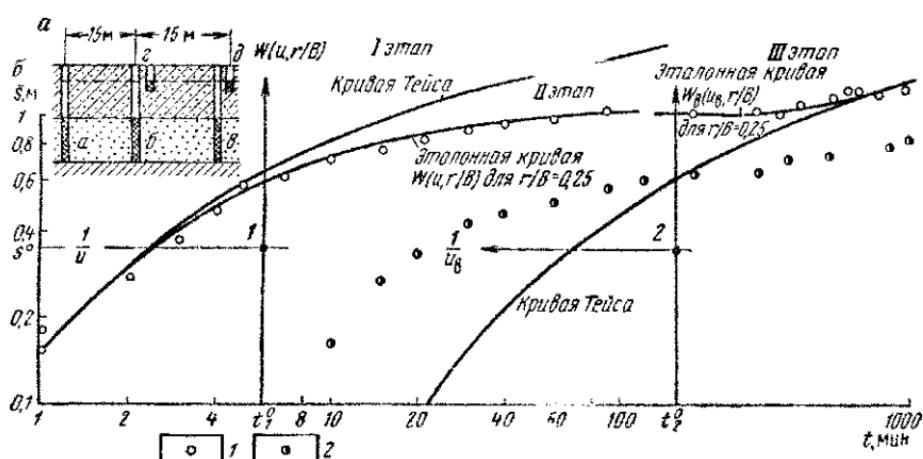


Рис. 34. Откачка в двухслойном пласте.

а — откачка опытного куста; б — определение параметров способом эталонной кривой;
1 — пьезометр «б»; 2 — пьезометр «с»

находится в слабопроницаемом слое, перекрывающем водоносный горизонт (рис. 34). При откачке в начальный период времени происходит сработка упругих запасов и в водоносном горизонте и в слабопроницаемом слое. Этот этап откачки (упругого режима) завершается стабилизацией напоров, обусловленной тем, что снижение свободной поверхности в начале откачки мало в сравнении с понижением в водоносном горизонте (см. рис. 34). Последнее связано с тем, что гравитационная водоотдача, как правило, на два-три порядка больше упругой водоотдачи водоносного горизонта. Если в верхнем слабопроницаемом слое пренебречь упругими запасами и считать режим фильтрации жестким, то первый этап откачки во всех отношениях будет подобен откачке с перетеканием из водоносного горизонта с постоянным напором. В связи с этим для обработки данных первого этапа откачки могут быть использованы все приемы, рассмотренные выше применительно к

схеме с постоянным напором в соседних слоях. Длительность первого этапа откачки определяется соотношением

$$t \approx 5 \frac{B^2}{a} \approx 5 \frac{m'}{k'} \mu^*. \quad (3.59)$$

Оценивая длительность первого периода откачки, например, при $m' = 10$ м, $k' = 0,05$ м/сутки, $\mu^* = 10^{-4}$, получим $t = 0,1$ сутки (2,5 ч). Как видно, в реальных условиях длительность первого этапа откачки невелика и лишь в исключительных случаях она может превышать одни сутки.

Этап II (ложностационарного режима) характеризуется весьма замедленным темпом снижения напоров. Продолжительность этапа II примерно можно оценить по формуле

$$\Delta t_{\text{лс}} = 5 \frac{B^2}{a} = 5 \frac{m'}{k'} \mu. \quad (3.60)$$

Принимая $\mu = 0,1$ (значения остальных параметров остаются прежними), получим $\Delta t_{\text{лс}} = 10$ суток. Как видно, продолжительность этого этапа может быть весьма длительной, во всяком случае соизмеримой с длительностью откачки. В этот период для обработки данных откачки могут быть использованы формулы (3.4) и (3.5) для условий стационарного режима перетекания. В третий период откачки вновь начинается снижение напора в водоносном горизонте. При этом наблюдается также и заметное снижение свободной поверхности (см. рис. 34). Темп снижения напора определяется главным образом гравитационной водоотдачей. Поэтому для описания III этапа откачки достаточно рассмотреть уравнение (1.20). Решение уравнения (1.20) для откачки с постоянным расходом впервые было получено Н. Болтоном [39]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W_B(u_B, r/B), \quad (3.61)$$

$$u_B = \frac{r^2}{4at}, \quad a = \frac{T}{\mu}, \quad B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}}.$$

Таблицы функции $W_B(u_B, r/B)$ приведены в приложении. При больших периодах времени

$$\left(t > 10 \frac{B^2}{a} = 10 \frac{m'}{k'} \mu \right), \quad (3.62)$$

$$W_B(u_B, r/B) = \ln \frac{2.25at}{r^2} \quad (3.63)$$

и снижение напора следует зависимости Тейса.

Таким образом, для описания всего процесса понижения напоров в двухслойном пласте используются функции М. Хантуша и Ч. Джекоба (3.1) (кривые типа A) и Н. Болтона (кривые типа B). Эти кривые показаны на рис. 35. Как видно, кривые типа A асимптотически приближаются к кривой функции $W(u)$, определяемой упругим режимом, а кривые типа B — к кривой функции $W(u_B)$, определяемой снижением свободной поверхности.

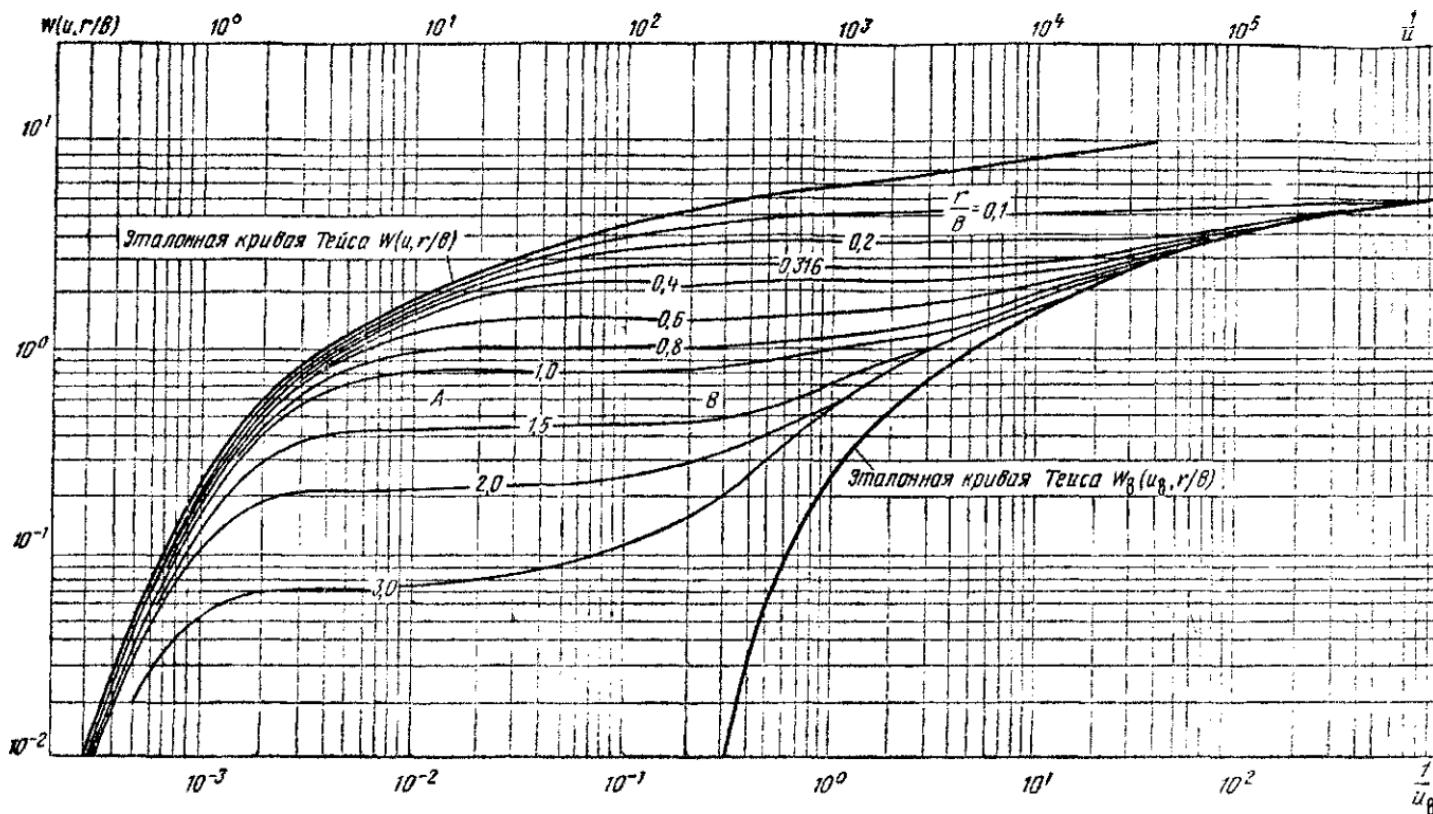


Рис. 35. Эталонные кривые функций $W(u, r/B)$ и $W_B(u_B, r/B)$

Поскольку методика определения параметров по материалам I и II этапов откачки рассматривалась выше (см. откачку при перетекании из пласта с постоянным напором), здесь следует остановиться на методике обработки данных III этапа откачки, которые изложены в работах [20, 21, 24]. Для определения величины водопроводимости, водоотдачи μ и коэффициента фильтрации слабопроницаемого слоя k' можно применить способ эталонной кривой. Этот способ обработки наблюдений целесообразен тогда, когда не соблюдается условие (3.62), т. е. режим фильтрации еще не становится квазистационарным. Эталонные кривые представляют собой графики функции $W_v^*(u_v, r/B)$ от $1/u_v$ в логарифмическом масштабе, построенные для различных значений r/B (см. рис. 35, кривые B). Значения понижения s в наблюдательных скважинах откладываются на графике в зависимости от отношения t/r^2 или t , также в логарифмическом масштабе. Совмещение эталонных кривых с точками графика производится таким образом, чтобы удовлетворялось соотношение (3.18). Величины проводимости T и коэффициента уровнепроводности a определяются сопоставлением координат любой фиксированной точки на графиках

$$T = \frac{Q}{4\pi s^0} W_v^*(u_v, r/B), \quad a = \frac{1}{4} \left(\frac{r^2}{t} \right)^0 \left(\frac{1}{u} \right)^0, \quad (3.64)$$

где s^0 и $(t/r^2)^0$ — координаты выбранной точки на графике с фактическим материалом, а $W_v^*(u_v, r/B)$ и $(1/u)^0$ — координаты этой же точки на графике с эталонной кривой. Фактор перетекания B определяется в зависимости от того, с какой из кривых r/B совмещаются опытные точки. Коэффициент фильтрации k' определяется далее по формуле (3.17). При длительной откачке, когда становится справедливой зависимость (3.30), для определения параметров можно использовать метод Ч. Джекоба, изложенный в § 2(«б») применительно к схеме откачки в изолированном пласте. Обычно в реальных условиях заметное проявление III этапа откачки начинается лишь по истечении 3—5 суток, а при значительном сопротивлении слабопроницаемого слоя — через 10—20 суток. Таким образом, оценить величину гравитационной водоотдачи по данным снижения напоров в водоносном горизонте во второй период оказывается не всегда возможным. В этом случае гидрогеологические параметры могут быть определены по I этапу откачки, а если он недостаточно выражен — по установившемуся периоду фильтрации по формулам (3.4) или (3.5). Гравитационную водоотдачу можно определить по данным о снижении свободной поверхности. Для этого выбирается период времени, когда скорость снижения свободной поверхности v_d становится постоянной, и используется формула

$$\mu = \frac{k'}{v_d} \frac{(s_h - s_v)}{m'}, \quad (3.65)$$

где s и s_B — понижения напора в горизонте и свободной поверхности. Поскольку в период ложностационарного режима снижение свободной поверхности мало, разницу в понижениях ($s - s_B$) можно приближенно определять по формуле (3.4). В этом случае снижение свободной поверхности происходит в прямой зависимости от времени

$$s_B = \frac{Qt}{2\pi B^2 \mu} K_0(r/B). \quad (3.66)$$

Как показано в работе [32], зависимость (3.66) оказывается достаточно строгой при малых периодах времени ($t < 0,25 \frac{m' \mu}{k}$).

Учитывая особенности режима откачки в двухслойном пласте, можно рекомендовать устанавливать не менее двух наблюдательных скважин с фильтрами в водоносном пласте, причем расстояние до первой наблюдательной скважины следует задавать 20—30 м, а до второй — 40—60 м. Для анализа снижения свободной поверхности около каждой наблюдательной скважины в водоносном пласте необходимо иметь пьезометр, фильтр которого установлен в интервале возможного снижения свободной поверхности (см. рис. 34, а). При неоднородном покровном слое, состоящем, например, из двух слоев, мощности которых m' и m'' , а коэффициенты фильтрации k' и k'' , целесообразно иметь дополнительный пьезометр, фильтр которого установлен на границе слоев (см. рис. 32, б). Соотношение коэффициентов фильтрации слоев в этом случае можно определить сопоставлением градиентов вертикальной фильтрации по формуле

$$\bar{k} = \frac{k'}{k''} = \frac{m' (s - s')}{m'' (s' - s_B)}, \quad (3.67)$$

где s' — понижение в среднем пьезометре.

Определив средний коэффициент фильтрации $k'_{ср}$ по формуле (3.17), можно вычислить k' и k''

$$k'' = \frac{m' + m''}{(m' + m'')} k', \quad k' = k'' \bar{k}. \quad (3.68)$$

В более сложном случае неоднородность слабопроницаемого слоя оказывает большое влияние на снижение напоров в водоносном горизонте, проявляющееся в том, что водоотдача μ будет меняться в ходе откачки в зависимости от того, в каком слое происходит снижение свободной поверхности.

Рассмотренные выше зависимости для двухслойного пласта справедливы при постоянной величине водоотдачи μ . Вместе с тем, учитывая в общем случае замедленный процесс водоотдачи, связанный с инерционностью капиллярной зоны, предельное значение коэффициента водоотдачи может быть получено только на заключительных стадиях откачки при $t > 100 \frac{v_d H_k}{k'^2}$, где H_k — приведенная высота

капиллярной зоны. При реальных значениях параметров ($v_d = 0,1$ м/сутки, $H_k = 2$ м, $k' = 0,1$ м/сутки) данный период составляет 200 суток. Это объясняет то, что коэффициенты водоотдачи, определяемые при сравнительно кратковременных откачках, оказываются значительно меньше величин, рассчитанных по формуле (1.5а).

Пример. Для примера рассмотрим данные откачки, которая проводилась с дебитом $Q = 500$ м³/сутки в водоносном пласте, сложенном мелкозернистыми песками мощностью 10 м, перекрыт он суглинками с мощностью водоносной части $m' = 8$ м (см. рис. 34). График снижения напора в ближней наблюдательной скважине «б» и пьезометре 2, расположенных на расстоянии $r = 15$ м, показаны на рис. 34. Определение параметров проводилось способом эталонной кривой. Предварительно величина водопроводимости определялась по формуле Дююн по двум наблюдательным скважинам ($T = 120$ м²/сутки). Опытные точки, соответствующие этапу I, совмещались с эталонной кривой $W(u, r/B)$, а точки, соответствующие этапу III, с кривой $W_b(u_b, r/B)$ таким образом, чтобы проводимость, определяемая по формулам (3.19а) и (3.64), примерно соответствовала 120 м²/сутки. Далее значение проводимости уточнялось при подборе эталонных кривых. Подбор проводился так, чтобы значения r/B кривых функции $W(u, r/B)$ и $W_b(u_b, r/B)$ были одинаковыми. Как видно, опытные точки на графике хорошо ложатся на кривые со значением $r/B = 0,25$. Координаты фиксированных точек 1 и 2 на графике с эталонными кривыми равны: $W^\circ(u, r/B) = 1$, $(1/u)^\circ = 10$, $W_b^\circ(u_b, r/B) = 1$, $(1/u)^\circ = 10$. Соответствующие им координаты на графике понижения от времени равны: $s_1 = 0,35$ м, $t_1 = 6$ мин. (этап I) и $s_2 = 0,35$ м, $t_2 = 160$ мин (этап III). Величину проводимости можно определить по формуле (3.19 а) или (3.64).

$$T = \frac{Q}{4\pi s^\circ} W^\circ(u, r/B) = \frac{500}{12,68 \cdot 0,35} = 110 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Коэффициент пьезопроводности определяется по этапу I с помощью формулы (3.19).

$$a^* = \frac{r^2}{4t_1^\circ} \left(\frac{1}{u} \right)^\circ = \frac{2,25 \cdot 1440 \cdot 10}{4 \cdot 6} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Коэффициент уровнепроводности определим по этапу III по формуле (3.64).

$$a = \frac{r^2}{4t_2^\circ} \left(\frac{1}{u} \right)^\circ = \frac{225 \cdot 1440 \cdot 10}{4 \cdot 160} = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Таким образом, упругая водоотдача $\mu^* = 8 \cdot 10^{-4}$, а гравитационная водоотдача $\mu = 0,02$. Коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя определим по формуле (3.17), предварительно определив $B = 60$ м, из соотношения $r/B = 0,25 - k' = 0,25$ м/сутки.

Далее воспользовавшись наблюдениями за свободной поверхностью в пьезометре 2 (см. рис. 34), определим скорость ее снижения $v_d = 0,4$ м/сутки в период, когда она становится постоянной ($t > 300$ мин). Средняя разница в понижениях в этот период составляет 0,4 м. Далее по формуле (3.65) определим водоотдачу μ :

$$\mu = \frac{0,25 \cdot 0,4}{0,4 \cdot 8} = 0,03.$$

Как видно, полученное значение μ находится в соответствии с определенным ранее способом эталонных кривых.

К схеме гетерогенного строения пласта с двойной пористостью могут быть приведены различные по своему строению водоносные системы (см. рис. 19). Приток к водозаборной скважине в этих условиях формируется за счет сработки упругих запасов проницаемых зон (трещин), так и за счет упругоемкости слабопроницаемых блоков. Обычно для определения параметров используются приближенные решения, в которых в качестве основного допущения принимается предпосылка о пренебрежимо малой упругоемкости проницаемых зон в сравнении с блоками [2]. В этом случае система уравнений (1.17) приводится к уравнению (1.20) для двухслойного пласта (при

замене $b_{\text{в}}^2$ на $b_{\text{пп}}$ и a на $a_{\text{п}}$, где $a_{\text{п}} = \frac{k_{\text{т}} m_{\text{т}}}{\eta_{\text{п}} m_{\text{п}}}$). В последнем случае коэффициент пьезопроводности определяется только упругой водоотдающей блока. В такой постановке задача по определению параметров трещиновато-пористого пласта сводится к аналогичной задаче для двухслойного пласта. Определяемые при этом параметры $a_{\text{п}}$ и $b_{\text{пп}}$ (последний соответствует значению $1/B^2$ в формуле (3.64) и $T = k_{\text{т}} m_{\text{т}}$) позволяют установить параметр внутриблокового претекания P и водоотдачу пласта $\mu_{\text{п}}$.

$$P = b_{\text{пп}} k_{\text{т}} m_{\text{т}}; \quad (3.69)$$

$$\mu_{\text{п}} = \frac{2k_{\text{т}} m_{\text{т}}}{a_{\text{п}}}. \quad (3.70)$$

Для схемы слоистого строения, когда мощность блоков $m_{\text{п}} = \frac{m'}{2}$ (см. рис. 19, б), можно определить упругоемкость $\eta_{\text{п}}$ и коэффициент фильтрации $k_{\text{п}}$:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{2m_{\text{п}}}, \quad (3.71)$$

$$k_{\text{п}} = P m_{\text{п}}. \quad (3.72)$$

Большой интерес представляет возможность анализа всего процесса откачки, особенно в том случае, когда упругие запасы в трещинах или хорошо проницаемых пластах и блоках соизмеримы, что характерно, в частности, для схем, показанных на рис. 19. Общее решение системы уравнений (2.17) и (2.18) для условий постоянного расхода скважин, получено Н. Болтоном [39]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W^*(u^0, r/B, \bar{\mu}), \quad (3.73)$$

где $u^0 = \frac{r^0}{4at}$; $a^0 = \frac{T}{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{т}}}$; $\bar{\mu} = \frac{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{т}}}{\mu_{\text{п}}}$; $B = \frac{1}{V b_{\text{пп}}}$.

Таблицы функции $W^*(u^0, r/B, \bar{\mu})$ составлены Д. А. Манукяном [20]. Анализ (3.73) показывает, что при $\bar{\mu} > 100$ $W^*(u^0, r/B, \bar{\mu}) =$

$= W(u, r/B)$ для начального этапа откачки ($t < 10 \frac{m_n}{k_n} \mu_T$), а для III этапа при $t > 10 \frac{m_n}{k_n} \mu_T$ — $W^*(u^0, r/B, \bar{\mu}) = W_b(u^0, r/B)$. Общий вид этих кривых показан на рис. 36 для различных значений r/B при $\bar{\mu} = 20$. При $r/B < 0,1$ можно использовать приближенную формулу

$$W^*(u^0, r/B, \bar{\mu}) = W(u^0) + W\left[\frac{(r/B)^2 \bar{\mu}}{4u^0(\bar{\mu} - 1)}\right] - W\left[\frac{(r/B)^2 \bar{\mu}^2}{4u^0(\bar{\mu} - 1)}\right], \quad (3.74)$$

где $W_{(x)}$ — функция скважины.

Для определения фильтрационных параметров можно пользоваться способом эталонных кривых [20]. Однако применение этого способа в данном случае связано с некоторой неопределенностью, обусловленной тем, что ход снижения напора зависит от многих параметров, что затрудняет выбор той или иной кривой из всей серии. В связи с этим представляется целесообразным комплексирование этого способа с графоаналитическим. Анализ зависимости (3.73) показывает, что график понижения s от $\lg t$ имеет ряд особенностей, позволяющих определить параметры с большой достоверностью.

Для начальной стадии откачки (I период) при $t < 0,1 \frac{\mu_T m_n}{k_n}$ снижение напора практически следует зависимости Тейса

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25 a_T t}{r^2}. \quad (3.75)$$

Для больших периодов времени ($t > 10 \frac{m_n}{k_n} \mu_T$) (III период) снижение напора также следует зависимости Тейса, но определяется суммарной водоотдачей

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25 a^0 t}{r^2}. \quad (3.76)$$

Как видно, графики зависимости понижения от логарифма времени (см. рис. 36) имеют два прямолинейных участка, склоны которых практически одинаковы, соответствующих I и III периодам откачки. Эти участки удалены друг от друга по оси $\lg t$ на величину $\Delta \lg t = \lg \bar{\mu}$. В переходный период темп снижения напора уменьшается и график имеет точку перегиба в момент времени $t_{1,2}$

$$t_{1,2} \approx \frac{\ln \bar{\mu}}{b_{\mu_T} a_T}. \quad (3.77)$$

Уклон кривой в точке перегиба $t_{1,2}$ определяется только соотношением коэффициентов водоотдачи $\bar{\mu}$

$$m_{1,2} \approx 1 - \left(\frac{1}{\bar{\mu}}\right)^{\frac{1}{\bar{\mu}-1}} + \frac{1}{\bar{\mu}}. \quad (3.78)$$

Понижение в точке перегиба $s_{1,2}$ определяется соотношением (3.5), в котором B следует заменить на $1/\sqrt{b_{\mu_T}}$. Гидрогеологические параметры T , a_T и a^0 можно определить в рассматриваемом случае

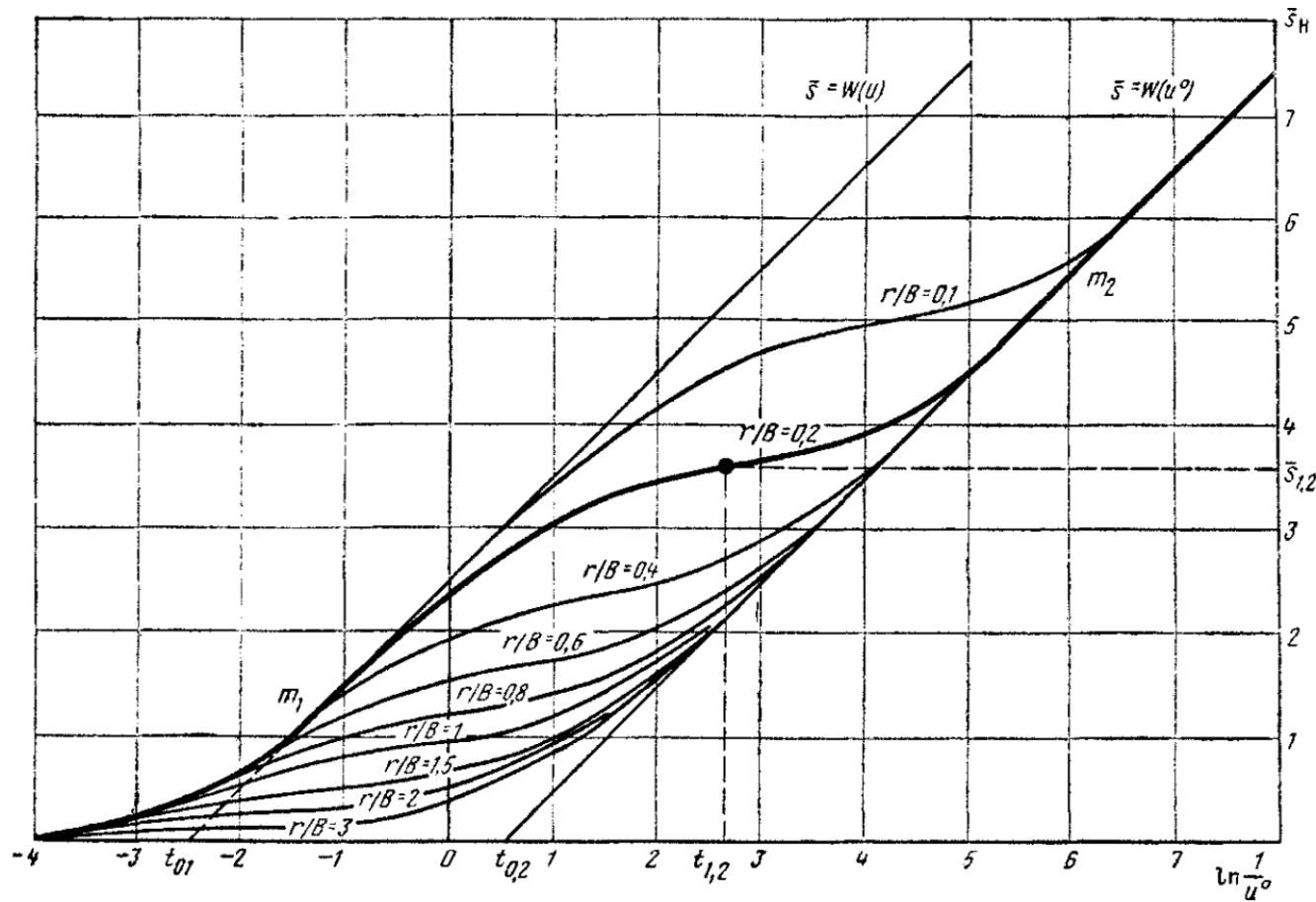


Рис. 36. График прослеживания снижения напора в трещиновато-пористом пласте

по прямолинейным участкам полулогарифмического графика методом Джекоба. Упругоемкую водоотдачу блока μ_n далее рассчитывают по формуле

$$\mu_n = \frac{T}{a^0} - \mu_t. \quad (3.79)$$

Величину фактора перетекания B можно определять, сопоставляя понижения в двух наблюдательных скважинах подбором из соотношения (3.22) или по формуле (3.9), предварительно определив проводимость. В том случае, если прямолинейные участки графиков выражены недостаточно четко, лучше использовать способ эталонной кривой. При этом предварительно следует найти значение r/B по формуле (3.22) по понижениям в точке перегиба. Значение $\bar{\mu}$ примерно можно определить по формуле (3.77). После этого для уточнения параметров можно использовать уже определенную эталонную кривую для известных $\frac{r}{B}$ и $\bar{\mu}$. Следует отметить, что эталонные кривые функции W^* (a^0 , r/B , $\bar{\mu}$) могут быть использованы и для обработки данных откачки в двухслойной среде. При этом в (3.73) следует заменить μ_n на μ и μ_t на μ^* . Сопоставляя длительность переходного периода $t_{1,2}$, определяемую примерно соотношением (3.77), и угловой коэффициент в точке перегиба, можно видеть, что ощущаемое влияние двойной пористости может проявляться только при $\bar{\mu} > 1,0$. При большем различии в коэффициентах пьезопроводности ($\bar{\mu} > 100$) уклон кривой в точке перегиба равен нулю и схема с двойной пористостью практически соответствует схеме двухслойного пласта, где в качестве основного допущения принимается, что коэффициент упругой водоотдачи μ^* пренебрежимо мал в сравнении с коэффициентом гравитационной водоотдачи μ . Важно отметить, что в большинстве случаев можно ограничиться определением только водопроводимости T и коэффициента пьезопроводности a^0 , т. е. тех параметров, знание которых достаточно для большинства гидрогеологических прогнозов.

Расчеты коэффициентов фильтрации и емкости слабопроницаемых блоков или пластов, необходимые только при специальных гидрогеологических исследованиях (например, при обосновании захоронения промышленных стоков), следует проводить в общем случае для того, чтобы убедиться в правильности выбранной расчетной схемы. При правильной интерпретации данных о реакции пласта на возмущение значения этих параметров должны находиться в согласии с реально возможными в данных условиях.

§ 4. НЕСОВЕРШЕННЫЕ СКВАЖИНЫ В НАПОРНЫХ ПЛАСТАХ

Несовершенные скважины (не полностью вскрывающие водоносный пласт) используются для откаек и нагнетаний (наливов) в тех случаях, когда опробуемый пласт имеет слишком большую

мощность для опробования из совершенной скважины, а также при необходимости поинтервальной оценки проницаемости пласта.

При откачках из несовершенных скважин, имеющих сравнительно небольшие размеры, режим фильтрации обычно довольно быстро стабилизируется, так что их обработку целесообразно производить при стационарном режиме. При этом для расчетов коэф-

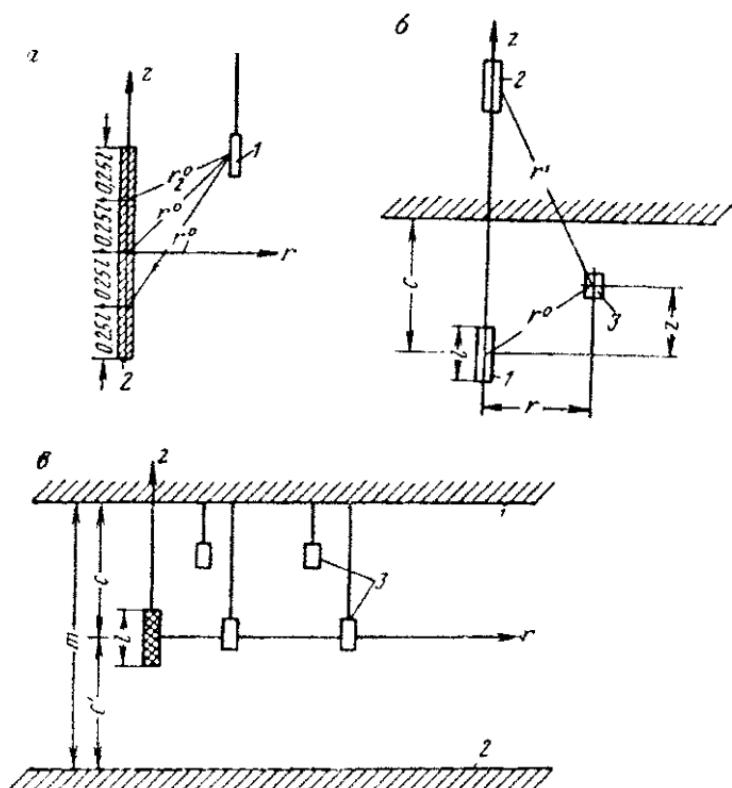


Рис. 37. Схемы расположения опытных скважин.

а — неограниченный пласт (1 — в 2 — наблюдательная и центральная скважины); б — полуграниченный пласт (1 — центральная скважина, 2 — отображение центральной скважины, 3 — наблюдательная скважина); в — пласт ограниченной мощности (1 — кровля, 2 — подошва, 3 — наблюдательные скважины)

фициента фильтрации используются прежде всего данные понижения уровня в наблюдательных скважинах, а по данным понижения уровня в центральной скважине оценивается сопротивление фильтра и прискважинной зоны. Данные же нестационарного режима целесообразно использовать для определения упругой сжимаемости водоносного пласта и оценки степени стабилизации режима.

Выбор расчетной схемы прежде всего определяется расположением скважин относительно кровли и подошвы пласта. Допус-

кая погрешность расчета 5—10%, можно пренебречь влиянием границ пласта (кровли или подошвы) при следующих условиях: для центральной скважины, когда она удалена от границы пласта на расстояние более чем полторы — две длины фильтра, а для наблюдательных скважин, если их расстояние до центральной r не более $1/5$ расстояния s от центра фильтра центральной скважины до границы. Если эти условия выполняются по отношению к кровле и подошве пласта, то можно использовать схему неограниченного по мощности пласта, а при выполнении этого условия только по отношению к одной из границ пласта (кровле или подошве) можно применять схему полуограниченного по мощности пласта (рис. 37, б). Следует иметь в виду, что в пределах одного опытного куста могут быть наблюдательные скважины, относящиеся к различным расчетным схемам.

В однородном пласте наблюдательные скважины рекомендуется располагать против центральных на расстоянии не менее 0,3 l , поскольку вблизи центральной скважины существенно проявляется неравномерность притока к скважине, а также могут повлиять нарушения прискважинной зоны. Длину наблюдательных скважин целесообразно при этом задавать сравнительно небольшой ($1 \div 3$ м) и ни в коем случае не более длины центральной скважины.

а. Откачки и нагнетания в пласте бесконечной мощности при стационарном режиме

В неограниченном пласте общее выражение для понижения уровня в любой точке пласта при стационарном режиме откачки можно записать в следующем виде [10, 36]:

$$s = \frac{Q}{4\pi k_p}, \quad (4.1)$$

основанном на формальной замене реальной скважины точечным стоком, причем величина s является расчетным расстоянием от центральной скважины до расчетной точки (наблюдательной скважины).

В неограниченном однородном пласте для определения величины r с точностью до 5% можно пользоваться выражениями, приведенными в табл. 18, обозначения к которым показаны на рис. 37, а.

Для расчетов коэффициента фильтрации выражение (4.1) можно переписать в виде

$$k = \frac{Q}{4\pi s_p}, \quad (4.2)$$

где величина s представляет собой понижение в наблюдательной или центральной скважине, а величина p определяется по выражениям табл. 18.

Таблица 18

Выражения для определения величины ρ

Наблюдательная скважина на расстоянии от центральной более l	Наблюдательная скважина на расстоянии от центральной ($0,3 \div 1$) l	Для центральной скважины
$r = r^0;$	$r = \sqrt{r_1^0 \cdot r_2^0};$	
$r^0 = \sqrt{z^2 + r^2}$	$r_1^0 = \sqrt{\left(z + \frac{l}{4}\right)^2 + r^2};$	$\rho = \frac{0,217l}{\lg \frac{r}{r_c}}$
	$r_2^0 = \sqrt{\left(z - \frac{l}{4}\right)^2 + r^2}$	

В случае расположения скважин вблизи подошвы или кровли пласта, когда используется схема полуограниченного пласта, зависимость для определения понижения имеет вид

$$s = \frac{Q}{4\pi k \rho} [1 + \bar{\rho}]; \bar{\rho} = \frac{\rho}{r}, \quad (4.3)$$

где r' — расстояние от отраженной центральной скважины до наблюдательной (см. рис. 37, б), а величина ρ по-прежнему определяется по данным табл. 18.

Для расчета коэффициента фильтрации выражение (4.3) перепишем в виде

$$k = \frac{Q}{4\pi s \rho} [1 + \bar{\rho}]. \quad (4.3a)$$

Для центральной скважины, располагаемой вблизи подошвы или кровли пласта, расчетная зависимость для определения коэффициента фильтрации представляется в виде

$$k = \frac{0,366 \cdot Q}{l s_{bc}} \cdot \bar{s}_{bc}, \quad (4.4)$$

где $\bar{s}_{bc} = \lg \frac{0,7l}{r_c} + A$; $A = \lg \frac{c + 0,5l}{c} + \frac{c - 0,5l}{l} \lg \frac{c^2 - 0,25l^2}{c^2}$, $(4.4a)$

причем для скважины, примыкающей к кровле или подошве пласта, $A = \lg 2 = 0,301$, а в неограниченном пласте $A = 0$.

Формулой (4.4) можно пользоваться и при обработке данных опытных нагнетаний (наливов) в водонасыщенные пласти, заменяя только понижение уровня s на повышение напора H_c и понимая под Q расход нагнетания (налива).

Если воспользоваться представлением об удельном водопоглощении q , понимаемом как расход налива, отнесенного к напору и длине фильтра ($q = \frac{Q}{l H_c}$), то при принимаемой обычно размерности $[q] = \text{л/мин} \cdot \text{м} \cdot \text{м}$, представим формулу (4.4) в виде

$$k = 0,528q \cdot \bar{s}_{bc}. \quad (4.5)$$

При обработке кустовых откачек определение коэффициентов фильтрации следует производить лишь по данным наблюдательных скважин, а данные понижений в центральных скважинах при этом используются для определения сопротивления прискважинной зоны, которое оценивается приведенным прискважинным сопротивлением Δf_c :

$$\Delta f_c = \frac{k \Delta s_c}{Q}, \quad (4.6)$$

где Δs_c — потери напора (скачок) в прискважинной зоне, или расчетным радиусом скважины

$$r_c' = r_c \exp(-2\pi \Delta f_c). \quad (4.7)$$

Величина Δf_c определяется по формуле

$$\Delta f_c = \frac{k \bar{s}_{hc}}{Q} - 0.366 \bar{s}_{hc}, \quad (4.8)$$

где величина \bar{s}_{hc} для неограниченного и полуограниченного пластов определяется из выражений (4.4a).

6. Откачки в пласте бесконечной мощности при упругом режиме фильтрации

В неограниченном пласте понижение уровня в наблюдательной скважине при откачке с постоянным дебитом определяется уравнением [10, 36].

$$s_t = s \operatorname{erfc} \lambda, \quad \lambda = \frac{r}{2 \sqrt{at}}, \quad (4.9)$$

где s — предельное понижение уровня, определяемое выражением (4.1), a — коэффициент пьезопроводности.

При $\lambda < 0,45$ с точностью до 5% можно считать $\operatorname{erfc} \lambda = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda$, и тогда уравнение (4.9) примет вид

$$s_t = s - \frac{Q}{4\pi k \sqrt{\pi at}}, \quad (4.10)$$

соответствующий условиям квазистационарного режима фильтрации, причем время t_{kv} поступления квазистационарного режима может оцениваться по формуле

$$t_{kv} = \frac{r^2}{4a(0.45)^2} = 1.2 \frac{r^2}{a}. \quad (4.11)$$

Обычно это время сравнительно невелико, так что для обработки данных нестационарного режима понижения уровней в этих условиях может использоваться уравнение (4.10), согласно которому зависимость понижения s_t от величины $\frac{1}{\sqrt{t}}$ должна быть прямолинейной. Поэтому по данным откачки удобно строить расчетный график зависимости s_t от $\frac{1}{\sqrt{t}}$; на этом графике прямая, проведенная

по опытным точкам, отсекает на оси s_t отрезок s , т. е. величину, равную предельному понижению в наблюдательной скважине, а на оси $\frac{1}{\sqrt{t}}$ отрезок, равный величине $\frac{1}{\sqrt{t_0}} = \frac{\sqrt{\pi a}}{\rho}$. Зная эти величины, можно вычислить значения k по формуле 4.2 и a из выражения

$$\sqrt{a} = 0,56 \cdot \rho \frac{1}{\sqrt{t_0}}. \quad (4.12)$$

При использовании же общего уравнения (4.9) обработка опытных откачек может быть проведена по способу эталонных кривых, причем эталонная кривая строится в координатах $\lg s_t$, $\lg \frac{1}{\lambda^2}$ и накладывается путем параллельного перемещения осей на график зависимости $\lg s_t$ от $\lg t$ (рис. 38).

Смещение осей координат составляет здесь величины $\lg \frac{Q}{4\pi k\rho}$ и $\lg \frac{\rho^2}{4a}$, по которым находятся параметры k и a .

В случае, когда несовершенная скважина располагается вблизи кровли или подошвы пласта и используется схема полуограниченного пласта (см. рис. 37, б), выражение для понижения s_t находится методом зеркальных отображений:

$$s_t = s (\operatorname{erfc} \lambda + \bar{\rho} \operatorname{erfc} \lambda'); \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho}; \quad \lambda' = \frac{r'}{2\sqrt{at}}. \quad (4.13)$$

Рис. 38. Определение параметров способом эталонной кривой

1 — эталонная кривая. 2 — опытные точки

При условии $\lambda' < 0,45$ выражение (4.13) упрощается и принимает вид

$$s_t = s - \frac{Q}{2\pi k \sqrt{\pi a t}}, \quad (4.14)$$

соответствующий квазистационарному режиму, причем величина s определяется по формуле (4.3). Зависимость (4.14) так же, как и (4.9), является уравнением прямой в координатах s_t , $\frac{1}{\sqrt{t}}$, поэтому способ обработки в данном случае будет таким же, как и при использовании зависимости (4.10). Прямая, проведенная по опытным точкам, нанесенным на графике с координатами s_t от $\frac{1}{\sqrt{t}}$, будет отсекать на оси s_t величину s , соответствующую предельному понижению напора (для данной наблюдательной скважины) в усло-

виях полуограниченного пласта и определяемую по формуле (4. 3), а на оси $\frac{1}{\sqrt{t}}$ — отрезок, равный величине

$$\frac{1}{\sqrt{t_0}} = \frac{(1 + \bar{\rho}) \sqrt{\pi a}}{2\rho}.$$

Определение коэффициента фильтрации следует далее проводить по формуле (4. 3 а), а коэффициент пьезопроводности находить по формуле

$$a = \left[\frac{1}{\sqrt{t_0}} \cdot \frac{2\rho}{(1 + \bar{\rho}) \sqrt{\pi}} \right]^2. \quad (4. 15)$$

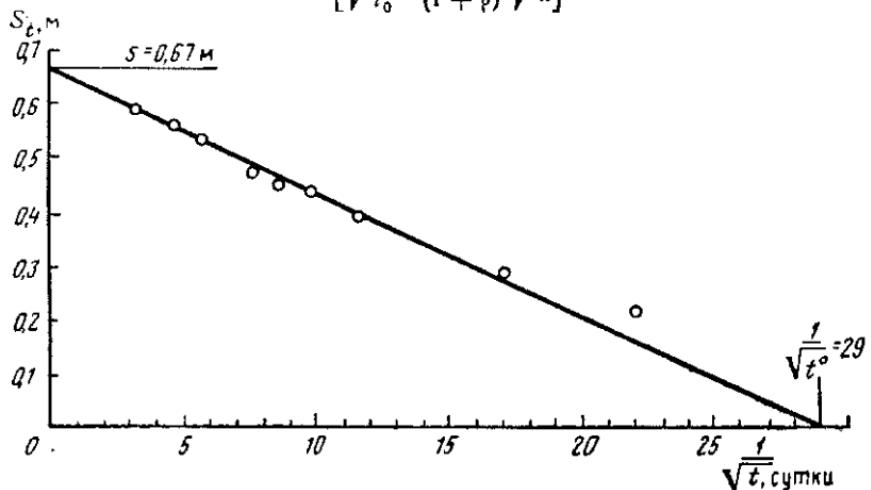


Рис. 39. Определение параметров по графику $s \left(\frac{1}{\sqrt{t}} \right)$ (кружками показаны опытные точки)

Критерий применимости такой методики расчета определяется временем наступления квазистационарного режима

$$t_{\text{кв}} = 1,2 \frac{(r')^2}{a}. \quad (4. 16)$$

На рис. 39 в координатах s_t от $\frac{1}{\sqrt{t}}$ нанесены данные по снижению напора в наблюдательной скважине, полученные во время откачки, проведенной в безнапорном водоносном горизонте мощностью 30 м, сложенном флювиогляциальными песками (Щемиловский полигон ВСЕГИНГЕО). Опытные скважины куста располагались вблизи подошвы горизонта таким образом, что можно было применить схему полуограниченного пласта, пренебрегая влиянием свободной поверхности (откачка длилась 4 ч). Дебит центральной скважины, оборудованной фильтром длиной $l = 4$ м, равнялся $147 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Расстояние от центральной скважины до наблюдательной составляло 5 м, т. е. можно считать $\rho = r^0 = 5$ м; расстояние до

отраженной скважины $r' = 7,2$ м, так что $\rho = \frac{r^0}{r'} = \frac{5}{7,2} = 0,7$. Как видно на рис. 38, прямая, проведенная по опытным точкам, отсекает на оси s_i отрезок $s = 0,67$ м, а на оси $\frac{1}{Vt}$ отрезок $\frac{1}{Vt_0} = 29$ суток $\frac{-1}{2}$. Коэффициент фильтрации вычисляем далее по формуле (4. 3а)

$$k = \frac{Q(1+\rho)}{4\pi\rho s} = \frac{147 \cdot 1,7}{12,6 \cdot 5 \cdot 0,67} = 6 \text{ м/сутки},$$

а коэффициент пьезопроводности по формуле (4. 15)

$$a = \left[\frac{1}{Vt_0} \cdot \frac{2\rho}{(1+\rho)V\pi} \right]^2 = \frac{(29)^2 \cdot 4 \cdot 25}{3,14 \cdot 2,9} = 9,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

По вычисленному значению a можно оценить время наступления квазистационарного режима согласно (4. 16): $t_{kv} = 1,2 \frac{(7,2)^2}{9,2 \cdot 10^3} = 0,007$ суток, что соответствует величине $\frac{1}{Vt_{kv}} = 12$ суток $^{-1}$; как видно из

рис. 39, эта величина действительно соответствует моменту выхода опытных точек на прямую линию.

Обработку данных нестационарного режима нередко удобнее проводить по режиму восстановления уровней, поскольку в начальный период откачки может существенно изменяться ее дебит.

Для обработки данных о восстановлении уровней в наблюдательных скважинах при времени восстановления t_b , меньшем времени откачки не менее чем в 10 раз (с ошибкой не более 5%), могут использоваться приведенные выше зависимости, в которых понижения уровня заменяются на повышение уровня относительно предельно достигнутого при откачке, а время отсчитывается от момента остановки откачки.

При анализе данных восстановления уровней следует только иметь в виду, что упругие свойства пласта довольно часто проявляются по-разному при откачке и восстановлении уровней. При этом коэффициент пьезопроводности, определенный по данным восстановления, как правило, несколько больше, чем по данным откачки. Естественно, что при таком положении ход снижения уровней при откачке не соответствует ходу подъема уровней при восстановлении. На рис. 40 представлены данные по снижению и восстановлению уровней в наблюдательной скважине, полученные при откачке, проведенной в водоносном горизонте, сложенном мелко- и тонкозернистыми песками. Как видно, кривая восстановления смещена по оси s_i относительно кривой снижения, что свидетельствует о несколько больших скоростях восстановления уровней по сравнению с ожидаемыми. Величина коэффициента пьезопроводности, определенная по данным восстановления, оказывается при этом в четыре раза больше величины, полученной по данным откачки.

Полагая, что величина коэффициента пьезопроводности $a \approx 10^4 \text{ м}^2/\text{сутки}$ является нижним пределом для упругих пластов,

можно оценить время наступления квазистационарного режима по формулам (4.11) и (4.16). Расчеты по этим формулам, проведенные для реальных величин расстояний между скважинами, показывают, что для неограниченного пласта $t_{kv} \ll 5$ мин; для полуограниченного, при расположении скважин на кровле или подошве $t_{kv} \ll 8 \div 20$ мин. Отсюда следует, что в первом случае для обработки данных необходимо использовать зависимость (4.10), а в пласте полуограниченном зависимости (4.13) и (4.14). Интересно отметить,

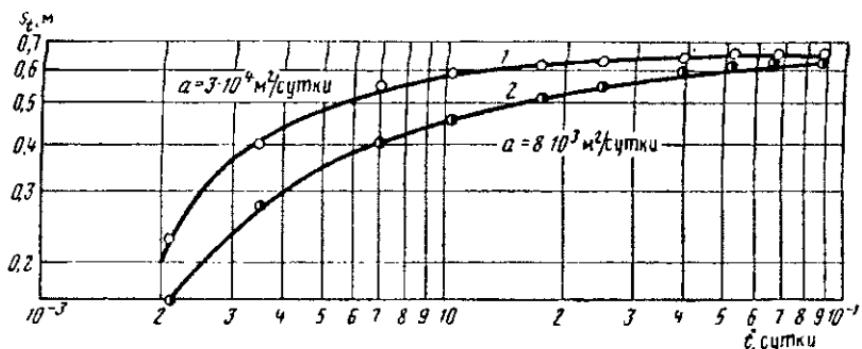


Рис. 40. Графики понижения и восстановления напоров в напорном пласте (1 — кривые восстановления и снижения)

что на время $t = t_{kv}$ при откачке в неограниченном пласте величина понижения s_{kv} будет составлять практически 0,5 м, а в условиях полуограниченного пласта $s_{kv} = s \frac{1}{(1 - \rho)}$, где s определяется по формуле (4.3). При этом s_{kv} может составлять 0,7—0,8 м. Таким образом, начальный участок нестационарного режима будет весьма информативным и замеры уровней в начале откачки или восстановления следует проводить часто (через 1—2 мин).

Длительность откачки должна обеспечить получение на опытной кривой представительного участка квазистационарного режима, причем понижение на конец откачки должно быть не менее 0,9 м, при $s \geq 0,8 \div 1$ м. Оценка дебита при этом проводится по формулам (4.1) и (4.3) при ориентировочно заданном коэффициенте фильтрации. В реальных пластах для определения гидрогеологических параметров обычно достаточно провести откачку из несовершенных скважин длительностью 2—3 ч.

в. Откачки в пласте ограниченной мощности

Обработка данных откачек, проводимых в пластах ограниченной мощности (см. рис. 37, в), для начального нестационарного периода откачки существенно затруднена, поскольку характер процесса оказывается весьма сложным, что находит свое отражение в существующих для этих целей расчетных зависимостях [11, 29, 42].

Значительно более простыми оказываются расчетные зависимости для наблюдательных скважин, расположенных на расстоянии более длины фильтра от центральной скважины при наступлении квазистационарного режима фильтрации, когда уравнение, описывающее понижение уровня, можно представить в следующем виде [10, 11, 36]:

$$s_t = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2,25at}{r^2} + \xi \right]. \quad (4.17)$$

Для определения величин ξ , учитывающих несовершенство скважин и зависящих от относительных размеров $\bar{r} = \frac{r}{m}$, $\bar{z} = \frac{z}{m}$, $\bar{c} = \frac{c}{m}$, составлены расчетные графики при различном расположении центральной и наблюдательной скважин (рис. 41). Данные этих графиков показывают, что наибольших значений функция ξ достигает в том случае, когда наблюдательные скважины располагаются против фильтра центральной.

Следует иметь в виду, что оценка влияния гидродинамического несовершенства опытного куста с использованием уравнения (4.17) приемлема только при условии сравнительно однородного строения водоносного пласта и может приводить к заметным погрешностям при существенных проявлениях слоистости пласта.

Уравнение (4.17) позволяет провести обработку данных понижений уровня и наблюдательных скважин, удаленных на расстояние более длины фильтра от центральной скважины путем построения графика зависимости s_t от $\lg t$, который должен иметь прямолинейный характер с угловым коэффициентом $0,183 Q$. Снимая с этого графика значения понижений s_1 и s_2 , соответствующие значениям $\lg t_1$ и $\lg t_2$, можно определить проводимость пласта по формуле

$$T = 0,183Q \frac{\lg t_2 - \lg t_1}{s_2 - s_1}, \quad (4.18)$$

а по значению s_0 , отсекаемому этой прямой на оси s , определяется коэффициент пьезопроводности по формуле

$$a = 0,445r^2 \exp \left(12,6 \frac{T \cdot s_0}{Q} - \xi \right). \quad (4.19)$$

Проводимость пласта при квазистационарном режиме откачки может быть также определена по разнице понижений в двух наблюдательных скважинах, находящихся от центральной на расстояниях r_1 и r_2 , используя формулу

$$T = \frac{0,366 \cdot Q}{(s_1 - s_2)} \left[\lg \frac{r_2}{r_1} + 0,217 (\xi_1 - \xi_2) \right], \quad (4.20)$$

непосредственно следующую из (4.17), причем ξ_1 и ξ_2 определяются для соответствующих наблюдательных скважин.

Условие квазистационарности потока предварительно может быть установлено исходя из прямолинейного характера графика

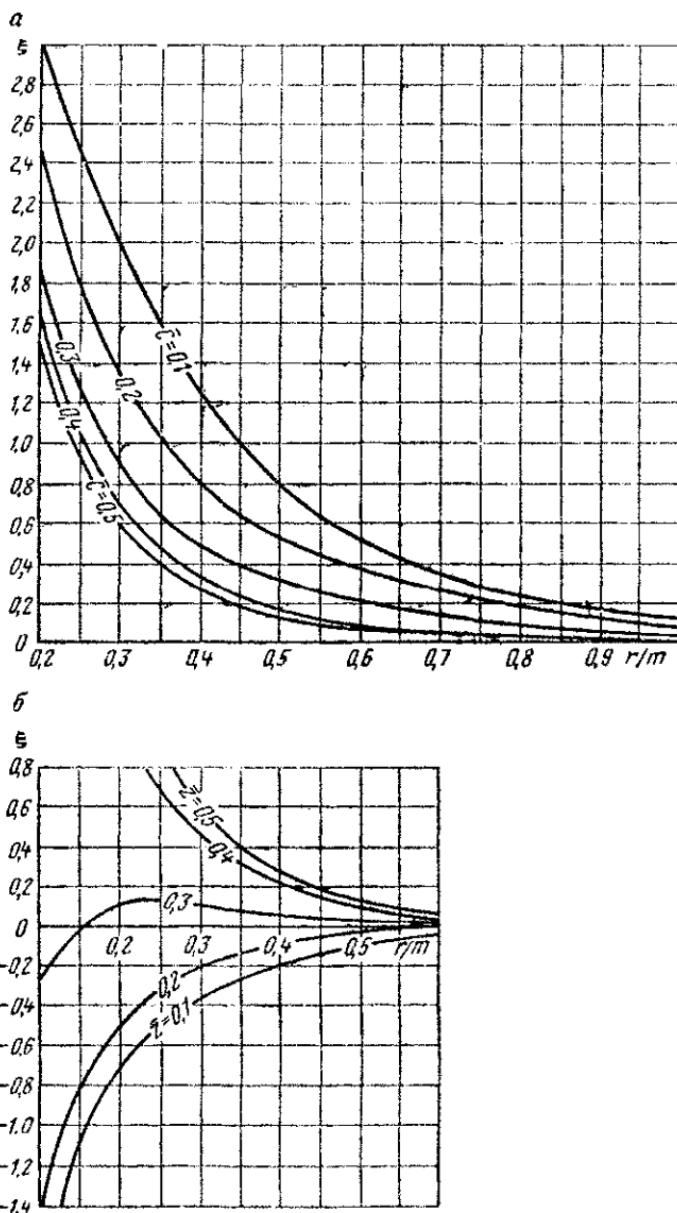


Рис. 41. Графики ξ

а — для наблюдательных скважин, расположенных против фильтра центральной; б — для наблюдательных скважин, расположенных на различном уровне от середины центральной скважины, при расположении последней в середине пласта. $\xi = \xi/m$ — относительное заглубление центральной скважины под кровлю; $z = z/m$ — то же для наблюдательной

зависимости s от $\lg t$. После определения коэффициента пьезопроводности можно оценить время наступления квазистационарного режима

$$t_{\text{кв}} \cong 3 \cdot \frac{r^2}{a}. \quad (4.21)$$

Из (4.21) нетрудно видеть, что при $a = 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}$ и $r = 20-50 \text{ м}$ получается $t_{\text{кв}} = 0,03-0,1 \text{ сутки}$, т. е. обычно квазистационарный режим должен наступать в первые же часы откачки.

Параметры Δf_c или r_c , характеризующие сопротивление прискважинной зоны, определяются по формулам (4.7) — (4.8), в которых величину s_{nc} обычно можно определить по формуле (4.4a). При этом должно соблюдаться условие $m - c > (1,5 \div 2)l$, обеспечивающее возможность использования для центральной скважины схемы пласта бесконечной мощности.

г. Особенности обработки откачек в анизотропных пластах

Для однородно-анизотропных пластов, характеризующихся различными коэффициентами фильтрации k и k_z в горизонтальном и вертикальном направлениях, расчетные зависимости, определяющие понижения уровня в любой точке пласта, получаются из аналогичных зависимостей для изотропных пластов путем деформации одной из координатных осей. Обычно такое преобразование делается в радиальном направлении, когда оно сводится к замене радиального расстояния r на величину $r\sqrt{\eta}$, где $\eta = \frac{k_z}{k}$. При этом расчетное значение коэффициента фильтрации получается равным k для наблюдательных скважин и $\sqrt{k \cdot k_z}$ — для центральной скважины.

Таким образом, в неограниченном анизотропном пласте для определения понижения уровня в наблюдательных скважинах остается в силе выражение (4.1), в котором только при определении ρ по табл. 23 следует принимать

$$r^0 = \sqrt{z^2 + \eta \cdot r^2}, \quad r_1^0 = \sqrt{\left(z + \frac{l}{4}\right)^2 + \eta \cdot r^2},$$

$$r_2^0 = \sqrt{\left(z - \frac{l}{4}\right)^2 + \eta \cdot r^2}. \quad (4.22)$$

Для случая расположения наблюдательной скважины на одном уровне с центральной при $k < k_z$ может оказаться $r\sqrt{\eta} < 0,3$; в этом случае следует считать

$$\rho = \frac{l}{2 \operatorname{Arsh} \frac{l}{2r\sqrt{\eta}}}. \quad (4.23)$$

Для определения величин k и k_z необходимо иметь опытный куст с двумя наблюдательными скважинами, расположеннымными на

разных уровнях относительно центральной скважины, причем одну из наблюдательных скважин целесообразно располагать на уровне середины центральной скважины *.

По данным понижения уровня s_1 и s_2 в этих скважинах, имеющих координаты соответственно r_1, z_1 и r_2, z_2 , прежде всего определяется коэффициент анизотропии η , используя выражение для соотношения понижений уровня

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (4.24)$$

где ρ_1 и ρ_2 выражаются согласно (4.22) соответственно при $r = r_1, z = z_1, r = r_2, z = z_2$. В общем случае величина η находится из соотношения (4.24) подбором; при удалении наблюдательных скважин от центральной скважины более чем на величину $l\sqrt{\eta}$ (когда можно считать $\rho = r^0$) для определения η можно пользоваться формулой

$$\eta = \frac{z_1^2 s_1^2 - z_2^2 s_2^2}{r_2^2 s_2^2 - r_1^2 s_1^2}. \quad (4.25)$$

Далее по формуле (4.2); приняв $s = s_1$ и $\rho = \rho_1$ (или $s = s_2$ и $\rho = \rho_2$), получим величину коэффициента фильтрации k в горизонтальном направлении, после чего найдем и $k_2 = \eta \cdot k$. Аналогичным путем могут проводиться расчеты для полуограниченного и ограниченного по мощности пласта. Так, для полуограниченного пласта соответственно модифицируется выражение для расстояния до отраженной скважины, которое в данном случае имеет вид

$$r' = \sqrt{(2c - z)^2 + \eta r^2}, \quad (4.26)$$

а выражение для соотношения понижений в двух наблюдательных скважинах, используемое для определения величины η , будет

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1}}{\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_2}}. \quad (4.27)$$

Для ограниченного пласта соотношение понижений представится в виде

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\bar{s}_1}{\bar{s}_2}, \quad (4.28)$$

где величины \bar{s}_1 и \bar{s}_2 находятся для наблюдательных скважин согласно (4.17) при $z = z_1, r = r_1\sqrt{\eta}$ и $z = z_2, r = r_2\sqrt{\eta}$.

Следует заметить, что если для анизотропных пластов непосредственно использовать зависимости, полученные для изотроп-

* Рекомендации по построению и обработке откачек в анизотропных пластах впервые предложены В. Д. Бабушкиным [1].

ных пластов, то результаты дадут искаженное представление о соотношении проницаемостей в различных направлениях. Так, например, в случае $k > k_z$ расчеты по наблюдательной скважине, расположаемой против центральной, дадут меньший коэффициент фильтрации, чем по наблюдательной скважине, расположаемой над центральной, поскольку в анизотропных пластах влияние откачки в горизонтальном направлении в большей мере диктуется вертикальной проницаемостью, и наоборот. В частности, расчеты по наблюдательной скважине, расположаемой на одной оси с центральной (при $r = 0$), дают значение коэффициента фильтрации, близкого к горизонтальному.

д. Экспресс-налив (откачка) в несовершенной скважине

Экспресс-наливом называется опыт по единовременному заливу воды в скважину с последующим наблюдением за восстановлением уровня. При выводе расчетных зависимостей для экспресс-налива обычно предполагается, что вблизи скважины сразу же устанавливается квазистационарный режим фильтрации, на который, кроме того, практически не влияют границы потока. В связи с этим при проведении экспресс-налива в покровных отложениях рекомендуется заглублять фильтр скважины под свободную поверхность не менее чем на полторы длины фильтра (рис. 42, а).

В указанной постановке расход Q потока, выходящего из скважины, связывается с избыточным напором H в скважине выражением

$$Q = k l^0 \cdot H, \quad (4.29)$$

где l^0 — расчетный размер рабочей части скважины, который для скважины с фильтром длиной l и радиусом r_c имеет выражение

$$l^0 = \frac{2,73 \cdot l}{0,7 l}, \quad (4.29a)$$

а для скважины (кольца) диаметром d_k , работающей только дном,

$$l^0 = 5d_k. \quad (4.29b)$$

Баланс воды в скважине определяется из условия, что расход Q компенсируется снижением уровня в ней, т. е.

$$-\omega_t dH = Qdt, \quad (4.30)$$

где ω_t — площадь горизонтального сечения скважины над статическим уровнем воды.

Совместное решение уравнений (4.29) и (4.30) дает дифференциальное уравнение с разделяющими переменными, которое после интегрирования приводится к виду

$$\ln \frac{H_0}{H} = \frac{k l^0}{\omega_t} t, \quad (4.31)$$

где $H_0 = \frac{V}{\omega_t}$ — высота начального столба воды при наливе.

Из уравнения (4.31) следует, что на графике зависимости величины $\lg \frac{H_0}{H}$ от времени t (см. рис. 42, б) опытные точки должны ложиться на прямую линию, приходящую в начало координат. Беря на этой прямой любую точку с координатами $\lg \frac{H_0}{H}$, t , можно определить коэффициент фильтрации по формуле

$$k = 2,3 \cdot \frac{\omega_t}{l^0 t} \lg \frac{H_0}{H}. \quad (4.32)$$

Приведенные зависимости могут применяться и для обработки экспресс-откачек с заменой в расчетных формулах повышений уровня H их соответствующими понижениями s .

Анализ приведенных выше зависимостей для экспресс-опробований показывает, что применение этого вида работ рационально в сравнительно слабо проницаемых породах (ориентировочно, при $k < 1$ м/сутки). Следует отметить, что достоверность оценки проницаемости по данным экспресс-налива (или откачки) в значительной степени зависит от сохранности прискважинной зоны, поэтому для их применения требуется доказательство незначительного влияния сопротивления прискважинной зоны.

Весьма эффективным является использование данных экспресс-наливов для оценки сопротивления открытых наблюдательных скважин, определяющих их инерционность при замерах уровней в процессе нестационарного режима фильтрации. В этом случае происходит водообмен между водоносным пластом (в месте расположения наблюдательной скважины) и самой скважиной, расход которого Q_{nc} определяется скоростью изменения количества воды в наблюдательной скважине v_{nc} , т. е. при площади горизонтального сечения трубы скважины $\omega_t = \pi r_t^2$ имеем $Q_{nc} = \pi r_t^2 v_{nc}$. В связи с этим между скважиной и пластом возникает разница напоров ΔH_{nc} , которую для несовершенной скважины с фильтром, заглубленным под уровень свободной поверхности водоносного горизонта, можно считать равной избыточному напору H , определяемому согласно зависимости (4.29) при $Q = Q_{nc}$, т. е.

$$\Delta H_{nc} = \frac{Q_{nc}}{k l^0} = \frac{\pi r_t^2 v_{nc}}{k l^0}. \quad (4.33)$$

Обозначая $\frac{\pi^2 T}{k l^2} = \frac{1}{\theta}$, представим формулу (4.33) в следующем расчетном виде:

$$\Delta H_{\text{nc}} = \frac{v_{\text{nc}}}{\theta}. \quad (4.34)$$

Таким образом, для оценки инерционности открытой наблюдательной скважины необходимо провести в ней экспресс-налив, определить по изложенной выше методике величину θ , характеризующую сопротивление прифильтровой зоны, а затем оценивать погрешности замера напоров в несовершенной наблюдательной скважине по формуле (4.34), где v_{nc} представляет собой скорость изменения уровней в скважине на любой расчетный период времени (положительная при подъеме и отрицательная при их спаде); при этом величина истинного напора H в водоносном пласте при измеренном напоре H_c в наблюдательной скважине будет

$$H = H_c + \Delta H_{\text{nc}}. \quad (4.35)$$

§ 5. ОТКАЧКИ В БЕЗНАПОРНОМ ПОТОКЕ

а. Совершенные скважины

Основные теоретические положения. При стационарном режиме особенности формирования безнапорного потока вблизи совершенной скважины связаны с изменениями мощности пласта при снижении уровня и с деформациями сетки движения, обусловленными криволинейным характером свободной поверхности потока. Проявления этих факторов существенно зависят от строения потока по вертикали.

Обычно для безнапорного потока в качестве основной принимается схема Дюпюи (однородного строения на горизонтальном водоупоре с осреднением напоров по вертикали), когда расход радиального потока Q в любом сечении на расстоянии r от скважины имеет выражение

$$Q = 2\pi k r h_d \frac{dh_d}{dr}. \quad (5.1)$$

где h_d — глубина потока, определяемая на основании использования схемы Дюпюи. Разделяя в выражении (5.1) переменные и произведя его интегрирование, получим уравнение Дюпюи для радиального потока

$$h_d^2 = h_c^2 + \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (5.2)$$

где h_c — глубина потока в скважине, имеющей радиус r_c .

Переходя от глубин потока h_d к соответствующим понижениям уровня s_d относительно статического положения, определяемого начальной глубиной потока h_0 , можно записать, что

$$h_0^2 - h_d^2 = 2s_d (h_0 - 0.5s_d) = 2h_0 s^0, \quad (5.3)$$

$$h_0^2 - h_c^2 = 2s_c (h_0 - 0.5s_c) = 2h_0 s_c^0,$$

где s^0 и s_c^0 — приведенные понижения, имеющие выражения

$$s^0 = s_{\alpha} \left(1 - \frac{s_{\alpha}}{2h_0}\right), \quad s_a^0 = s_c \left(1 - \frac{s_c}{2h_0}\right). \quad (5.4)$$

Тогда уравнение (5.2) примет вид

$$s^0 = s_c^0 + \frac{Q}{2\pi k h_a} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (5.5)$$

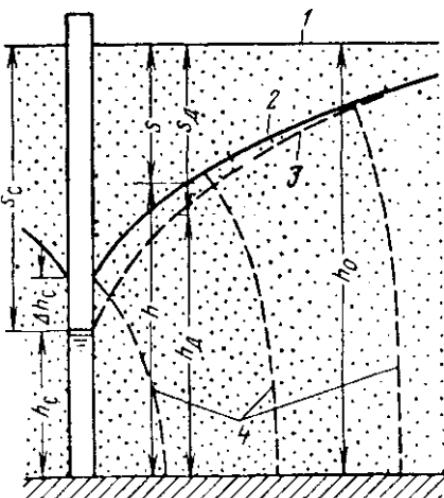
соответствующий уравнению Дюпюи (2.8) для напорного потока мощностью h_0 .

Аналогичные преобразования можно произвести и для горизонтальнослоистого пласта, используя представление о функции Гиринского [10, 36].

Близи скважины в связи с кривизной свободной поверхности безнапорного потока предпосылка Дюпюи заметно нарушается, что приводит, в частности, к образованию участка высачивания на

Рис. 43. Картина фильтрационного потока при откачке из совершенной скважины в безнапорном потоке.

1 — статический уровень; 2 — свободная поверхность; 3 — кривая Дюпон; 4 — линии равного напора



стенке скважины (рис. 43). Размер участка высачивания (высота высачивания) Δh_c определяется в относительно однородном потоке по формуле [10]

$$\Delta h_c = \sqrt{\left(0,73 \lg \frac{V \bar{Q}}{r_c} - 0,5\right) \bar{Q} + h_c^2} - h_c, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{k}. \quad (5.6)$$

Разница напоров Δh по основанию потока (на водоупоре) и на свободной поверхности (на расстоянии r от центральной скважины) может быть далее определена по уравнению [35]

$$\Delta h = \Delta h_c \frac{K_0(\bar{r})}{K_0(\bar{r}_c)}, \quad \bar{r} = \frac{3r}{h}, \quad \bar{r}_c = \frac{3r_c}{h_c + \Delta h_c}, \quad (5.7)$$

где K_0 — функция Бесселя, значения которой приведены в приложении.

Величина h_d соответствует осредненному напору в данном сечении, который уже на небольшом расстоянии от центральной скважины оказывается практически равен среднему из значений напоров на свободной поверхности и на водоупоре. Следовательно, можно считать

$$h = h_d + 0,5\Delta h. \quad (5.8)$$

Закономерности нестационарного режима при откачке из скважин в безнапорных пластах осложняются не только нарушением предпосылки Дюпюи вблизи скважины, но и замедлением гравитационной водоотдачи, обусловливаемым влиянием капиллярных сил.

Количественные закономерности динамики гравитационной водоотдачи пока изучены довольно слабо; по некоторым экспериментальным данным [23] можно предполагать, что изменение величины μ в основном зависит от высоты опускания уровня, что, по-видимому, связано с влиянием высоты капиллярного поднятия.

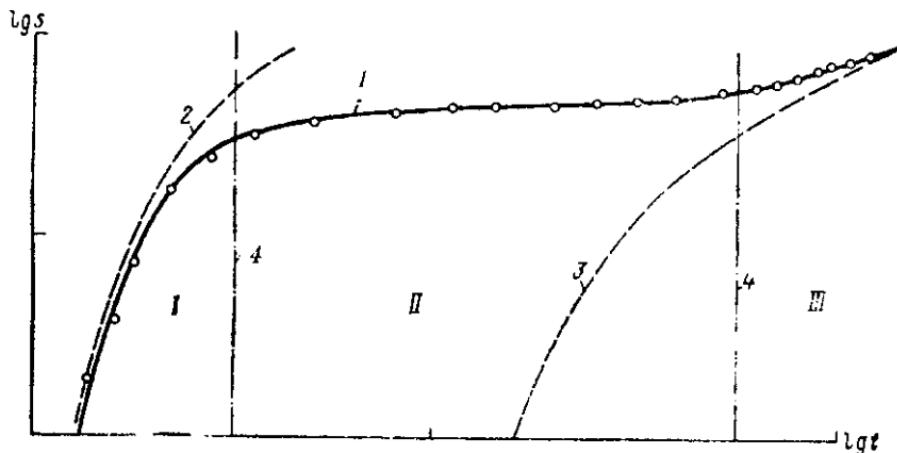


Рис. 44. График зависимости поижения уровня при откачке в безнапорном потоке (в билогарифмическом масштабе).

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

Теоретический анализ показывает [35], что за пределами зоны резкого нарушения предпосылки Дюпюи вертикальные сопротивления потока и динамику водоотдачи можно учитывать на основе предпосылок теории перетекания, принимая, что удельное вертикальное сопротивление Φ_z (на единицу площади горизонтального сечения потока) имеет вид

$$\bar{\Phi}_z = \frac{m_z}{k_z} + \frac{h_k}{k_k}, \quad (5.9)$$

где m_z — расчетный путь вертикальной фильтрации (в однородном потоке $m_z = 1/3 h$); k_z — вертикальный коэффициент фильтрации; h_k — эффективная высота капиллярной зоны; k_k — расчетный коэффициент фильтрации капиллярной зоны, который судя по экспериментальным данным [23], изменяется примерно пропорционально скорости опускания уровня.

Проведенный в такой постановке теоретический анализ режима снижения уровней, результаты которого подтверждаются натурными данными [27, 39], показывает, что в процессе откачки выделяются три периода: упругий (упругогравитационный), ложностационарный и гравитационный (рис. 44).

В течение периода упругогравитационного режима водоотдача пласта вначале имеет главным образом упругий характер, а затем постепенно интенсифицируется поступление воды со свободной поверхности за счет гравитационной водоотдачи. В этот период понижения напоров в каждом сечении существенно меняются по вертикали, а понижение среднего по сечению напора при откачке с постоянным дебитом будет описываться уравнением перетекания (3.1), в котором надо положить

$$a = \frac{T}{\mu_{\text{упр}}}, \quad B = \sqrt{T \bar{\Phi}_z}, \quad (5.10)$$

где $\bar{\Phi}_z$ определяется согласно (5.9).

В период ложностационарного режима наступает состояние кажущейся стабилизации напоров, объясняемой временным равновесием между увеличивающейся гравитационной водоотдачей и оттоком в сформировавшейся воронке депрессии. На графике $\lg s - \lg t$ в этот период наблюдается точка перегиба, свидетельствующая о переходе к гравитационному режиму. Различие между напорами по вертикали в каждом сечении сохраняется; в точке перегиба понижение среднего по сечению напора определяется уравнением (3.9) при значении фактора перетекания « B », задаваемом согласно (5.10).

Наступление гравитационного режима, характеризующегося интенсификацией снижения уровней, связано со стабилизацией гравитационной водоотдачи и уменьшением влияния вертикальных сопротивлений в связи с увеличением размеров воронки депрессии. Приближенное выражение для понижения уровней в этом случае имеет вид [27, 39]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W_b(\bar{r}, u_b), \quad \bar{r} = \frac{r}{B}, \quad u_b = \frac{\mu r^2}{4Tt}; \quad (5.11)$$

эталонные кривые функции $W_b(\bar{r}, u)$ приведены на рис. 35. В течение этого периода характер снижения напоров постепенно выравнивается по вертикали и становится таким же, как и в напорном потоке, но с заменой коэффициента $\mu_{\text{упр}}$ на коэффициент гравитационной водоотдачи, т. е. в неограниченном пласте понижение уровней описывается уравнением (2.1) при $a = T/\mu$.

Методика обработки данных опытных откачек. При стационарном режиме для определения коэффициента фильтрации удобно исходить из уравнения Дюпон в форме (5.5), в котором должны быть прежде всего по выражениям (5.4) определены приведенные понижения уровня s^0 и s_c^0 в наблюдательных и центральной скважинах. Для наблюдательных скважин сначала определяются величины s_d , учитывающие искривление линий тока вблизи скважины, причем согласно (5.8) имеем

$$s_d = s + 0,5\Delta h, \quad (5.12)$$

где величина Δh на расстоянии r от центральной скважины определяется по формуле (5.7) при высоте высасывания, рассчитываемой согласно (5.6), причем в первом приближении для расчетов

Δh_c можно задавать $\bar{Q} = 1,2s_c h_0$, а затем уточнять величину \bar{Q} используя значение коэффициента фильтрации, полученное в первом приближении.

Анализ показывает [35], что на расстоянии от центральной скважины примерно равном глубине потока поправки Δh оказываются уже несущественными, и поэтому при $r \gg h_0$ можно считать $s = s_d$.

После определения приведенных понижений дальнейший расчет ведется по тем же зависимостям, что и для напорного потока с постоянной проводимостью, соответствующей ее исходному значению $T = kh_0$.

Обрабатывая данные нестационарного режима откачки для расчетов T и B , можно использовать первый и второй периоды, а для расчетов μ следует использовать второй и третий периоды (ложностационарного и гравитационного режимов). При этом предварительно следует провести расчет величины B по данным этапа ложностационарного режима, имея замеры в нескольких наблюдательных скважинах по одному лучу. Для расчетов используют метод эталонных кривых, аналогично тому, как это делается для обработки откачки в слоистых пластах (см. § 3). Уравнение (3.1) и выражение для \bar{r} могут быть переписаны в форме

$$\lg s = \lg \frac{Q}{2\pi T} + \lg K_0(\bar{r}); \quad \lg \bar{r} = \lg r - \lg B. \quad (5.13)$$

Эталонная кривая в координатах $\lg K_0$, $\lg \bar{r}$ предварительно строится на кальке (по данным таблиц приложения), а фактическая кривая зависимости понижения s от расстояния r строится в логарифмических координатах для выбранного момента времени (см. рис. 29, a).

При совмещении эталонной кривой с фактической согласно (5.13) их параллельно координатные оси отсекают отрезки, равные по горизонтали величине $\lg B$ и по вертикали величине $\lg \frac{Q}{2\pi T}$, из которых могут быть найдены численные значения B и T . Для любой последующей точки с координатами (s, r) и (K_0, \bar{r}) , взятой из совмещенных кривых

$$B = \frac{r}{\bar{r}}, \quad T = \frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{K_0(\bar{r})}{s(r)}. \quad (5.14)$$

При $\bar{r} < 0,03$ функция $K_0(\bar{r})$ может быть заменена выражением $\ln \frac{1,12}{\bar{r}}$, и в этом случае для расчетов можно использовать зависимости, основанные на уравнении Дюпюи. Погрешность δ такой замены при разных значениях аргумента \bar{r} характеризуется следующими данными:

\bar{r} %	0,04	0,08	0,10	0,20	0,30
δ%	0,6	1	1,4	4,6	8,3

Коэффициент гравитационной водоотдачи наиболее достоверно определяется по данным третьего (гравитационного) режима с использованием уравнения (5.11); методика такого определения аналогична описанной выше (см. § 3) для откачки в двухслойном пласте. Однако для таких расчетов необходимо проведение довольно длительной откачки (обычно не менее 10—15 суток), что следует, например, из графика, приведенного на рис. 45 по данным Н. Болтона [39].

Более рациональным представляется определение μ по данным снижения уровней свободной поверхности, которые фиксируются наблюдательной скважиной-дублером, расположенной непосредственно под свободной поверхностью. В такой скважине заметные понижения уровней фиксируются во втором периоде при формировании ложностационарного режима в заглубленной скважине. В этом случае из уравнения вертикального перетока можно получить следующую формулу для определения коэффициента гравитационной водоотдачи

$$\mu = \frac{k_z \Delta s_z}{v_h \Delta z}, \quad (5.15)$$

где Δs_z — разница понижения уровней в наблюдательных скважинах-дублерах; Δz — разница их заглублений (между серединами фильтров); v_h — скорость снижения уровня свободной поверхности, фиксируемая по верхней скважине.

Для расчетов по формуле (5.15) необходимо знать величину k_z ; в общем случае для этого надо предварительно определить параметр перетекания B согласно (5.14), а также аналогичный коэффициент B_0 по данным понижения s^0 в верхней скважине, считая, что в точке перегиба кривой s^0 ($\lg t$) понижение описывается уравнением (3.1) с коэффициентом перетекания B_0 . Тогда по соотношению понижений s^0 и s в скважинах-дублерах в момент проявления точки перегиба имеем

$$K_0 \left(\frac{r}{B_0} \right) = \frac{s^0}{s} K_0 \left(\frac{r}{B} \right), \quad (5.16)$$

откуда можно найти значение B_0 , после чего определить величину k_z по формуле (5.15), которая примет в этом случае вид

$$\mu = \frac{\Delta s_z \cdot T}{v_h (B^2 - B_0^2)}. \quad (5.17)$$

Если же на графике s^0 ($\lg t$) точка перегиба не выявляется, то в формуле (5.17) можно положить $B_0 = 0$.

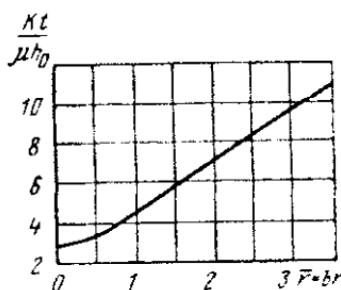


Рис. 45. График для расчетов времени t возможного использования решения Тейса в безнапорном потоке

Общие положения. При откачке из несовершенных скважин, располагаемых вблизи свободной поверхности безнапорного потока (рис. 46), форма кривых снижения уровня в наблюдательных скважинах оказывается примерно такой же, как и при откачке из совершенных скважин, т. е. на этих кривых выделяются периоды упругого, ложностационарного и гравитационного режимов. Специфическим в данном случае является обычно слабое проявление начального упругого режима в связи со сравнительно близким расположением наблюдательных скважин от центральной. Поэтому в данном случае можно достаточно четко выделить два периода: ложностационарный и гравитационный (рис. 47).

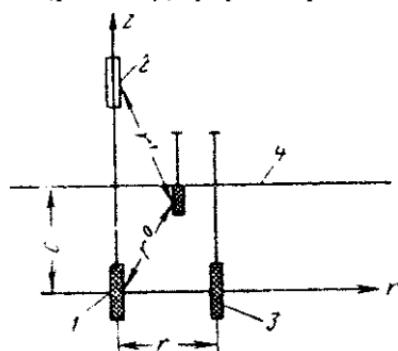


Рис. 46. Схема расположения опытных скважин вблизи свободной поверхности.

1 — центральная скважина; 2 — отбор из центральной скважины; 3 — наблюдательная скважина; 4 — свободная поверхность (расчетная кровля пласта)

практической стабилизации. Особенно хорошо этот период выражен для скважин, располагающихся против фильтра центральной. В конце этого периода на графике снижения уровня наблюдается точка перегиба, после которой скорости снижения уровня начинают возвращаться.

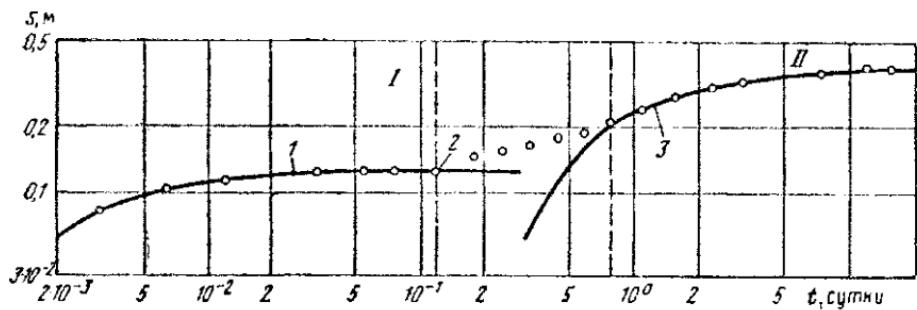


Рис. 47. Кривая снижения уровней в пласте с гравитационной водоотдачей. I — ложностационарный участок кривой; II — гравитационный участок кривой; 1 — кривая, построенная по зависимости (5.17); 2 — точка перегиба, понижение в которой определяется по формуле (5.18); 3 — кривая, построенная по зависимости (5.19).

Продолжительность первого этапа откачки в пластах значительной мощности зависит от величины заглубления опытных скважин под уровень свободной поверхности и в реальных условиях не превышает 0,1—0,5 суток.

Второй участок опытной кривой (после точки перегиба), характеризующийся повышением скоростей снижения уровней, соответствует наступлению гравитационного режима фильтрации. Ход снижения уровней на втором участке определяется условиями фильтрации в жестком пласте с гравитационной водоотдачей на свободной поверхности.

Рассмотрим расчетные зависимости в различные периоды откачки для условий однородного пласта и расположения опытного куста вблизи свободной поверхности (при расстоянии до наблюдательных скважин, не превышающих одной пятой мощности водоносного пласта), когда можно использовать расчетную схему водоносного пласта неограниченной мощности.

В первый период откачки понижения уровней в наблюдательных скважинах, расположенных вблизи центральной, описывается зависимостью

$$s_t = s (\operatorname{erfc} \lambda - \bar{\rho} \operatorname{erfc} \lambda'); \quad \lambda' = \frac{r'}{\rho} \lambda; \quad \lambda = \frac{\rho}{2 \sqrt{at}}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{r'}, \quad (5.17)$$

которая получается методом зеркальных отображений при упругом режиме фильтрации и задании постоянства напора на свободной поверхности. При этом величина ρ определяется по данным табл. 18, а предельное понижение уровня s по формуле (4.1). Из выражения (5.17) следует, что снижение уровней в наблюдательных скважинах стабилизируется на I этапе откачки при $\lambda' \approx 0,45$. Имея это в виду, можно оценить время практической стабилизации уровней на этом этапе (с точностью 5%) по формуле

$$t = 1,2 \frac{(r')^2}{a}. \quad (5.17a)$$

Понижение s на ложностационарном участке кривой s_t определяется по формуле [13, 36]

$$s' = s (1 - \bar{\rho}); \quad s = \frac{Q}{4 \pi k \rho}. \quad (5.18)$$

Расчетные зависимости для второго (гравитационного) периода снижения уровней получаются путем рассмотрения жесткого режима фильтрации при задании линеаризованного кинематического условия на свободной поверхности (1.22а), что допустимо при заглублении фильтра центральной скважины под уровень свободной поверхности на одну-полторы его длины.

В этом случае понижение уровня в наблюдательных скважинах можно описать уравнением [4, 33]:

$$s_t = s \cdot \bar{s}^0; \quad \bar{s}^0 = 1 + \bar{\rho} - \bar{s}_0; \\ \bar{s}_0 = \frac{2}{\sqrt{1 + \tau_0^2 + 2z_0 \tau_0}}; \quad \tau = \frac{kt}{\mu \rho}; \quad \bar{z} = \frac{z_0}{\rho}, \quad (5.19)$$

где z_0 — расстояние между уровнями заложения середины фильтров центральной и наблюдательной скважин; ρ — расчетнос-

расстояние до наблюдательных скважин, определяемое по табл. 18; μ — коэффициент гравитационной водоотдачи; s — определяется по формуле (4.1).

Если наблюдательные скважины располагаются непосредственно на свободной поверхности, в формуле (5.19) $\bar{z}_0 = \bar{c} = \frac{c}{\rho}$ и $\bar{\rho} = 1$.

Выражение для \bar{s}_0 в случае наблюдательной скважины, располагающейся непосредственно над фильтром центральной (при $c \approx \rho$), будет

$$\bar{s}_0 = \frac{2}{(1 + \bar{\tau}_0^2)}. \quad (5.20)$$

Если фильтры наблюдательных скважин располагаются против фильтра центральной, выражение для \bar{s}_0 (при $\bar{z}_0 = 0$) будет

$$\bar{s}_0 = \frac{2}{\sqrt{1 + \bar{\tau}_0^2}}. \quad (5.21)$$

В случае $\bar{\tau}_0 \gg \sqrt{1 + 2\bar{z}_0\bar{\tau}_0}$ уравнение (5.19) принимает вид

$$s_t = s [1 + \bar{\rho} - \bar{s}]; \quad \bar{s} = \beta \frac{1}{t}; \quad \beta = 2\rho \frac{\mu}{k}. \quad (5.22)$$

Время наступления такого перехода будет зависеть от конкретного расположения скважин, как это следует из структуры выражений (5.19) — (5.21). Расчеты показывают, что в уравнении (5.21) \bar{s}_0 может быть заменено на s с погрешностью менее 5% при $\bar{\tau}_0 \geq 4,5$, а в уравнении (5.19) при $\bar{\tau}_0 \geq 20$. Для всех наблюдательных скважин, находящихся между уровнем $z = 0$ и $z = c$, время, когда можно использовать уравнение (5.22), наступает при условии $4,5 < \bar{\tau}_0 < 20$. При $t \rightarrow \infty$ уравнение (5.22) переходит в (4.3).

Анализ зависимостей (5.19) — (5.22) показывает [33], что они практически применимы при снижении свободной поверхности s_0 над фильтром центральной скважины не больше 0,1с, если вести расчеты по наблюдательным скважинам, находящимся от центральной на расстоянии более l . Учитывая это обстоятельство и используя формулу (4.3), можно получить критерий по использованию приведенных выше зависимостей. Полагая в формуле (4.3) $\rho = c$ и имея в виду, что s_0 должно быть меньше или равно 0,1с, получим

$$c \geq 1,3 \sqrt{\frac{Q}{k}}. \quad (5.23)$$

Кроме того, поскольку при отсутствии сопротивления прискважинной зоны $Q = (1,3 - 2)klsc$, условие (5.23) можно представить в виде

$$c \geq 1,8 \sqrt{ls_c}. \quad (5.23a)$$

Соотношениями (5.23) и (5.23a) можно пользоваться при задании заглубления центральной скважины опытного куста относи-

тельно свободной поверхности водоносного горизонта, при этом величина коэффициента фильтрации в (5.23) задается ориентировочно.

Методика обработки данных опытных откачек. Для правильно определения гидрогеологических параметров по приведенным выше зависимостям следует внимательно запланировать расположение опытных скважин куста. С этой целью сначала нужно определить величину заглубления фильтра центральной скважины под уровень свободной поверхности, используя формулу (5.23) или (5.23а), а затем установить расположение наблюдательных скважин, исходя из того, что их расстояния от центральной не должны превышать $1/5$ расстояния до водоупора.

Длительность опытной откачки существенно различается в зависимости от определяемых параметров. В том случае, когда требуется определить только проницаемость однородного водоносного горизонта, достаточно получить данные по начальному периоду откачки (см. рис. 47). Определение коэффициента фильтрации при этом следует проводить по формуле

$$k = \frac{Q}{4\pi ps'} [1 - \bar{p}], \quad (5.24)$$

которая непосредственно получается из (5.18), причем величина s' представляет собой понижение уровня в наблюдательной скважине при практической его стабилизации в период ложностационарного режима. Время, необходимое для проведения такой откачки, оценивается по формуле (5.17а). В большинстве случаев для реальных водоносных горизонтов при расположении наблюдательных скважин против центральной на расстоянии одной-двух длин фильтра, это время не будет превышать 10—20 мин. Следовательно, для определения коэффициента фильтрации достаточно проведения откачки в течение 2—3 ч.

Когда имеются представительные данные по самому началу откачки и требуется оценить коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта, для обработки может использоваться уравнение (5.17). Обработка опытных данных в этом случае ведется по способу эталонных кривых.

Для определения коэффициента гравитационной водоотдачи на свободной поверхности требуется проводить длительную откачуку (обычно не менее 5—10 суток), поскольку в этом случае следует использовать данные периода гравитационного режима (см. рис. 47). Для корректировки длительности опытной откачки целесообразно в процессе ее проведения наносить опытные данные на график в координатах $\lg s_i$ от $\lg t$ и останавливать опыт тогда, когда на кривых ясно выразится второй участок гравитационного режима.

Опытные данные по гравитационному периоду откачки в общем случае могут быть обработаны по способу эталонных кривых. Для построения эталонных кривых используется уравнение (5.19), в

котором выражения для \bar{s}_0 принимаются в зависимости от расположения скважин, например, по формулам (5.20) и (5.21). Поскольку в этом случае каждой наблюдательной скважине будет соответствовать свое значение $\bar{r} = \frac{r}{r'}$, то для обработки данных используется серия эталонных кривых, построенных при разных значениях \bar{r} .

Рассмотрим ход обработки опытных данных способом эталонных кривых, используя зависимость (5.19). Логарифмируя само уравнение, а затем зависящий от времени аргумент функции, получим

$$\lg s_t = \lg s + \lg \bar{s}^0; \quad (5.25)$$

$$\lg \tau_0 = \lg \frac{k}{\mu \rho} + \lg t. \quad (5.25a)$$

Структура зависимостей (5.25) и (5.25a) показывает, что построив эталонную кривую в координатах $\lg \bar{s}^0$ от $\lg \tau_0$, а опытную кривую в координатах $\lg s_t$ от $\lg t$ и совместив их путем параллельного перемещения осей координат, определим величины $s = \frac{Q}{4\pi k \rho}$ (из соотношения $\lg s = \lg \frac{\bar{s}^0}{\bar{r}}$) и $\tau_0' = \frac{k}{\mu \rho}$ (из соотношения $\lg \tau_0' = \lg \frac{\tau_0}{t}$), по которым легко вычислить параметры k и μ .

На рис. 48, а нанесены данные по снижению уровня в наблюдательной скважине, полученные в процессе откачки в безнапорном водоносном горизонте мощностью около 250 м, сложенном пролювиальными галечниками. Откачка проводилась из скважины, оборудованной фильтром длиной 9 м, который был заглублен под уровень свободной поверхности на 18 м ($c = 18$ м). Откачка велась в течение 6 суток с дебитом 780 м³/сутки. Расстояние до расчетной наблюдательной скважины, расположенной против фильтра центральной, составляло 9 м ($r = r'$),

при этом $\bar{r} = \frac{r}{r'} = 0,24$. Совмещение эталонной кривой с опытными точками

дает величину $s = \frac{s_t}{\bar{s}^0} = 0,72$ м и $\tau_0' = \frac{\tau_0}{t} = \frac{2 \cdot 24}{6} = 8$ сутки. Используя выражения для s и τ_0' , получим $k = \frac{Q}{4\pi s^0} = \frac{780}{12,6 \cdot 0,72 \cdot 9} = 9,5$ м/сутки; $\mu = \frac{k}{\tau_0' \cdot \rho} = \frac{9,5}{8,9} = 0,13$.

Определение коэффициента фильтрации по ложностационарному участку опытной кривой с помощью формулы (5.24) дает величину $k = \frac{Q}{4\pi s^0 r^2} \times [1 - \bar{r}] = \frac{780 \cdot 0,76}{12,7 \cdot 0,49 \cdot 9} = 11$ м/сутки, которая достаточно хорошо согласуется с величиной, определенной способом эталонной кривой.

Конечный участок опытной кривой удобно обработать с помощью зависимости (5.22), строя график в координатах s_t и $\frac{1}{t}$. Прямая,

проведенная через опытные точки до пересечения с осями координат, отсекает на оси s_t величину s предельного понижения в полуограниченном пласте, определяемую по формуле (4.3), а на оси $\frac{1}{t}$ величину $\frac{1}{t'} = \frac{(1 + \bar{\rho})k}{2\rho_0 \mu}$, по которым находятся величины k и μ .

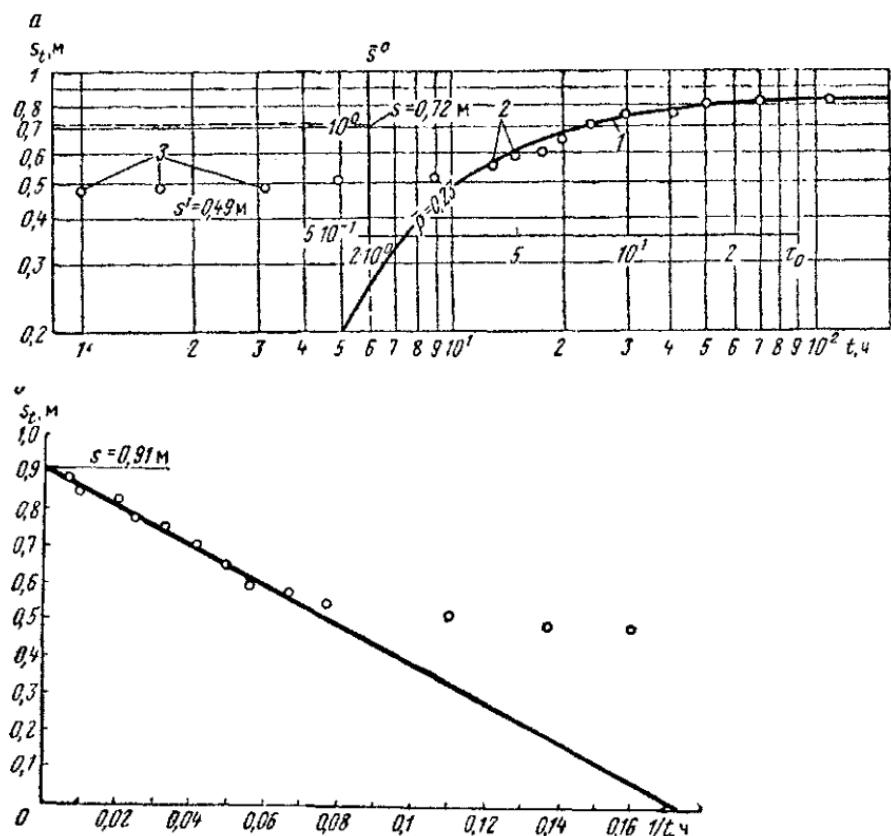


Рис. 48. Определение параметров в пласте с гравитационной водоотдачей.
а — способ эталонной кривой; б — график $s_t \left(\frac{1}{t} \right)$, кружками показаны опытные точки. 1 — эталонная кривая, 2 — опытные точки, относящиеся к гравитационному участку индикаторной кривой, 3 — опытные точки, относящиеся к ложностационарному участку индикаторной кривой

На рис. 48, б представлены данные по наблюдательной скважине, обработанные ранее способом эталонных кривых. Прямая, проведенная через опытные точки, соответствующие конечному участку опытной кривой, отсекает на оси s_t величину $s = 0,91$ м, а на оси $\frac{1}{t}$ величину $\frac{1}{t'} = 0,175 \frac{1}{\text{ч}}$. Используя выражения для этих величин, получим

$$k = \frac{Q}{4\pi s r_0} [1 + \bar{\rho}] = \frac{780 \cdot 1,24}{12,6 \cdot 0,91 \cdot 9} = 9,4 \text{ м/сутки}$$

$$\mu = \frac{(1 + \bar{\rho}) k}{2 \bar{\rho} \cdot \frac{1}{t'}} = \frac{1,24 \cdot 9,4}{18 \cdot 0,175 \cdot 24} = \frac{11,7}{75,5} = 0,15.$$

Как показывают проведенные расчеты, оба предлагаемых способа дают весьма близкий результат, однако более предпочтительной следует считать обработку данных с использованием зависимости (5.22), поскольку при этом путь вычислений и графических построений более прост. В том случае, когда данных по конечному участку кривой недостаточно и обработка их может быть осуществлена лишь с помощью эталонных кривых, после определения параметров необходимо сделать уточняющий расчет по формуле (5.19), подставляя в нее определенные величины k и μ .

Способы оценки параметров, характеризующих сопротивление прискважинной зоны в пласте с гравитационной водоотдачей, такие же, как и в напорных пластах, поскольку такая оценка ведется по данным стационарного режима фильтрации.

В заключение следует отметить, что приведенные выше зависимости справедливы только для сравнительно однородных пластов. В случае заметной вертикальной неоднородности водоносного горизонта использование этих зависимостей может привести к существенным ошибкам.

§ 6. ОТКАЧКИ У ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ГРАНИЦ ПЛАСТА

В этом случае рассматриваются откачки из совершенных скважин при наличии в зоне влияния откачки прямолинейной границы пласта.

а. Прямолинейная граница между зонами с различными гидрогеологическими параметрами

Рассмотрим особенности закономерностей откачек в напорном пласте из скважин, расположенных вблизи прямолинейной границы между двумя зонами с различными параметрами — проводимостью и упругой водоотдачей. Такая схема наиболее характерна для условий, когда откачка ведется из более проницаемого пласта, граничащего с пластом меньшей проницаемости.

Важным предельным случаем такой схемы является расположение скважины вблизи непроницаемой границы (рис. 49, а, б). Наличие такой границы учитывается заданием фиктивной откачивающей скважины с тем же дебитом Q , что и у действительной, поскольку в силу симметрии потока на линии, проходящей посередине между скважинами, градиент напора будет нулевым, т. е. эта линия представляет собой раздельную линию тока, аналогичную непроницаемой границе. Понижение уровня в этом случае получится сложением понижений, вызываемых влиянием действи-

тельной и фиктивной скважин, для каждого из которых справедливо выражение (2.1), т. е. в данном случае

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + W(u')]; \quad u = \frac{r^2}{4at}, \quad u' = \frac{(r')^2}{4at}. \quad (6.1)$$

Характер графика $s \rightarrow \lg t$ при этом будет иметь вид, представленный на рис. 49, *в*. В начальный период на снижение уровня граница практически не влияет, затем начинается переходный период, в течение которого влияние границы постепенно интенсифицируется, и, наконец, наступает период квазистационарного режима, когда можно принять логарифмические представления функции скважин, т. е. считать

$$W(u) = \ln \frac{2,25at}{r^2}$$

$$\text{и } W(u') = \ln \frac{2,25at}{(r')^2},$$

так что

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2,25at}{r^2} + \ln \frac{2,25at}{(r')^2} \right] = \\ = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2,25at}{rr'}. \quad (6.2)$$

Из этого выражения следует, что при квазистационарном режиме снижение уровней происходит по той же зависимости, что и в неограниченном пласте, но как бы при удвоенном дебите скважины и расчетном расстоянии, равном $\sqrt{rr'}$, т. е. среднегеометрическому из расстояний до действительной и фиктивной скважин. Соответственно, график $s \rightarrow \lg t$ в этот период является прямолинейным, но уклон его будет в два раза большим, чем при откачке в таком же неограниченном пласте.

Численный анализ показывает, что для наблюдательных скважин время t' наступления переходного периода можно определять по формуле

$$t' = 0,36 \frac{r'}{a} \sqrt{\delta_0 rr'}, \quad (6.3)$$

где δ_0 — погрешность в определении понижения уровня [36].

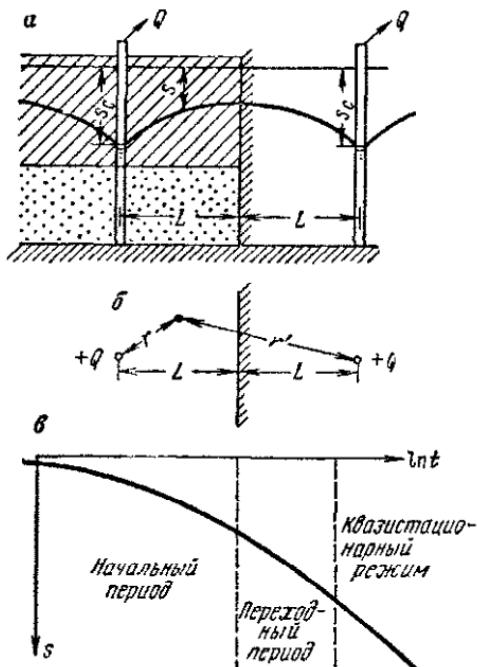


Рис. 49. Откачка вблизи прямолинейной непроницаемой границы.

а — разрез по нормали к границе, *б* — план расположения скважин, *в* — график понижения уровня в любой точке пласта (наблюдательной скважине) в полулогарифмических координатах

Для обработки данных такой откачки (при $t > t'$) можно воспользоваться способом эталонных кривых, для чего выражение (6.1) запишем в виде

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W_n(u), \quad W_n(u) = W(u) + W(u \cdot \bar{r}^2), \quad \bar{r} = \frac{r'}{r}. \quad (6.4)$$

Выражение (6.4) по форме идентично уравнению (2.1), только безразмерная функция скважины $W_n(u)$ имеет здесь несколько иной вид, причем она зависит от соотношения расстояний r и r' до центральной и зеркально отраженной скважин. Следователь-

но, в данном случае необходимо строить эталонную кривую зависимости $\lg W_n(u)$ от $\lg \frac{1}{u}$ для данной наблюдательной скважины (при конкретном значении \bar{r}), а дальнейшая обработка данных откачки ведется здесь так же, как и для откачки в неограниченном пласте.

При наступлении логарифмической зависимости (6.2) расчет ведется по способу Джекоба, причем для определения коэффициента пьезопроводности по формуле (2.30) величину r^2 следует заменять на величину $r \cdot r'$, а проводимость пласта определять по формуле (2.31) при удвоенном дебите скважины, т. е. в этом случае

$$T = 0,366 \frac{Q}{s' - s} \lg \frac{t_2}{t_1}. \quad (6.5)$$

В более общем случае, когда откачка ведется вблизи прямолинейной границы раздела зон с различными проводимостями T_1 , T_2 и коэффициентами пьезопроводности a_1 и a_2 (рис. 50, а), выражение для понижения уровня в любой точке (наблюдательной скважине) в полулогарифмических координатах

и коэффициентами пьезопроводности T_1 и a_1 (рис. 50, а), выражение для понижения уровня в зоне I (с параметрами T_1 и a_1) имеет вид [18]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W(u) + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} W(u') + \delta \right], \quad (6.6)$$

где $u = \frac{r^2}{4a_1 t}$; $u' = \frac{(r')^2}{4a_1 t}$; r — расстояние от центральной скважины до наблюдательной; r' — расстояние от зеркально отраженной относительно границы раздела центральной скважины до наблюдательной скважины; δ — функция, в общем случае зависящая от $\epsilon = \frac{T_1}{T_2}, \frac{a_1}{a_2}$ и u .

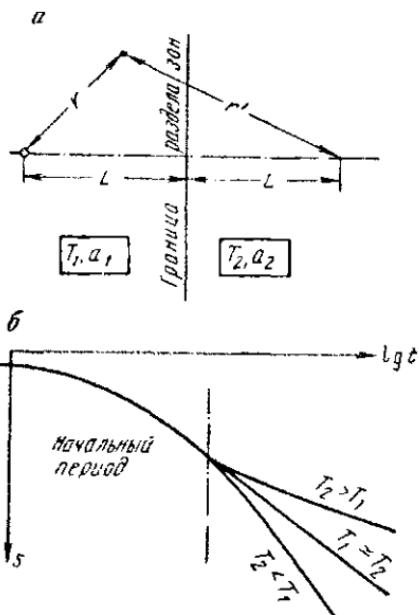


Рис. 50. Откачка вблизи прямолинейной границы между зонами с различными параметрами.

а — план расположения скважин; б — график понижения уровня в любой точке (наблюдательной скважине) в полулогарифмических координатах

и коэффициентами пьезопроводности T_1 , a_1 (рис. 50, а), выражение для понижения уровня в зоне I (с параметрами T_1 и a_1) имеет вид [18]

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W(u) + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} W(u') + \delta \right], \quad (6.6)$$

где $u = \frac{r^2}{4a_1 t}$; $u' = \frac{(r')^2}{4a_1 t}$; r — расстояние от центральной скважины до наблюдательной; r' — расстояние от зеркально отраженной относительно границы раздела центральной скважины до наблюдательной скважины; δ — функция, в общем случае зависящая от $\epsilon = \frac{T_1}{T_2}, \frac{a_1}{a_2}$ и u .

При условии $a' < 0,1$ с достаточной для практических расчетов точностью выражение (6. 6) преобразуется к виду:

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T_{cp}} \left(\ln \frac{2,25a_1 t}{r \cdot r'} + \frac{1}{\epsilon} \ln \frac{r'}{r} + \alpha \delta \right), \quad (6.7)$$

где

$$\alpha = 0,5 \left(1 + \frac{T_2}{T_1} \right); \quad T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (6.7a)$$

Значения величин $\alpha \delta$ для скважин, расположенных вблизи центральной или на луче, направленном нормально к границе раздела, при $a_1 t > 10L^2$ практически не зависят от времени и могут определяться по табл. 19, составленной Н. Н. Лапшиным и Л. К. Гохбергом.

Таблица 19

$\alpha = T_1/T_2$	Значение величин $\alpha \delta$					
	10^4	10^3	10	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
10^4	-0,51	-0,17	-0,04	0,01	0,011	0,011
10	-1,93	-1,0	-0,30	0,08	0,1	0,11
1	-3,0	-2,3	-1,13	0,60	0,77	0,82
10^{-1}	-3,3	-2,75	-1,50	1,50	2,6	3,0
10^{-2}	-3,3	-2,8	-1,50	1,77	3,5	5,1

Для определения проводимостей T_1 и T_2 выражение (6. 10) может быть представлено в виде

$$s = A + B \ln t, \quad (6.8)$$

где

$$B = \frac{Q}{4\pi T_{cp}}, \quad A = B \left(\ln \frac{2,25a_1}{r'} + \frac{1}{\epsilon} \ln \frac{r'}{r} + \alpha \delta \right). \quad (6.9)$$

Анализ графиков прослеживания $s = f(\ln t)$, построенных для наблюдательных скважин, расположенных вблизи опытной, показывает [7], что в начальные моменты времени на этом графике (рис. 50, б) выделяется отрезок прямой линии, соответствующий работе опытной скважины в безграничном пласте с параметрами первой зоны (T_1 и a_1) и описываемый уравнением вида (2.1) в гл. II § 2. При увеличении продолжительности откачки график $s = f(\ln t)$ оказывается или более пологим по сравнению с начальным уклоном (при $T_1 > T_2$), или происходит увеличение уклона анализируемого графика (при $T_1 < T_2$).

Имея данные изменения уровней по одной наблюдательной скважине, расположенной вблизи опытной, либо по двум наблюдательным, находящимся на различных расстояниях от опытной скважины, оказывается возможным определить проводимости

обеих зон T_1 и T_2 , а также пьезопроводность первой зоны — a_1 . Для этого сначала строится график $s = f(\ln t)$ по имеющимся наблюдательным скважинам. В этом случае, если на построенных графиках выделяются два прямолинейных отрезка, по первому из них по известным формулам для обработки откачек в однородных пластах определяются значения проводимости и пьезопроводности первой зоны T_1 и a_1 ; по угловому коэффициенту B второго участка графика определяется величина средней проводимости

$$T_{\text{ср}} = \frac{Q}{4\pi B}, \quad (6.10)$$

а по найденному значению $T_{\text{ср}}$ и известному T_1 определяется проводимость во второй зоне $T_2 = 2T_{\text{ср}} - T_1$.

Если наблюдательные скважины расположены вблизи границы раздела двух зон, то на графиках $s = f(\ln t)$ выделяется только один прямолинейный участок. Определив по этому участку величину уклона B , из выражения (6.10) находится величина $T_{\text{ср}}$. Значение ϵ может быть найдено из выражения

$$\epsilon = \frac{\ln \frac{r'_1 r_1}{r_2 r'_2}}{\frac{A_2 - A_1}{B_2 - B_1} - \ln \frac{r'_1 r_1}{r_2 r'_2}}, \quad (6.11)$$

где A_1, B_1 и A_2, B_2 — параметры, снимаемые с графиков $s = f(\ln t)$ для первой и второй наблюдательных скважин; r_1 и r'_1 — расстояния первой наблюдательной скважины до опытной и до ее зеркального отображения; r_2 и r'_2 — то же, для второй наблюдательной скважины.

По найденным значениям $T_{\text{ср}}$ и ϵ определяются величины проводимостей T_1 и T_2 :

$$T_2 = \frac{2}{1 + \epsilon} T_{\text{ср}}, \quad T_1 = \epsilon T_2. \quad (6.12)$$

Коэффициент пьезопроводности первой зоны a_1 устанавливается из выражения

$$a_1 = \exp \left(\frac{A}{B} - \frac{1}{\epsilon} \ln \frac{r'}{r} - \ln \frac{2,25}{r \cdot r'} - \alpha \delta \right). \quad (6.13)$$

Значение $\alpha \delta$ может быть взято из табл. 19, исходя из найденного соотношения проводимостей T_1/T_2 и ориентировочного соотношения пьезопроводностей a_1/a_2 , после чего его можно уточнить подбором.

б. Откачка вблизи реки (водоема)

Общие положения. При проведении откачки вблизи реки (водоема) специфической задачей является оценка сопротивлений ложа водоема, характеризующих взаимосвязь подземных (обычно грунтовых) вод с водоемом.

В фильтрационном потоке, формирующемся вблизи реки (водоема), могут возникнуть два режима фильтрации: свободный, когда в потоке, фильтрующемся из водоема, происходит разрыв сплошности, и водоем оказывается как бы подвешенным над грунтовым потоком, и подпёртый, когда фильтрация из водоема идет сплошным потоком, связанным с водоемом. Случай свободного режима фильтрации из водоема не требует специального рассмотрения, ибо при этом фильтрация из водоема не оказывает существенного влияния на характер снижения уровня в процессе откачки, так что при обработке откачки наличие подвешенной реки (водоема) может не учитываться. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться только случай подпёртого режима фильтрации. Типичной схемой строения ложа реки (водоема) является двухслойная; в этом случае подпёртый режим фильтрации сохраняется до тех пор, пока уровень воды в основном водоносном пласте не опустится ниже подошвы экранирующего слоя.

Заметим, что при мощной откачке зоны свободного режима фильтрации может образоваться в процессе откачки; такого положения допускать не следует, поскольку частичный переход подпёртого режима фильтрации в свободный резко осложняет методику обработки данных опытных откачек.

Сопротивление ложа крупных водоемов (водохранилищ, больших рек) характеризуется расстоянием ΔL , на которое следует сдвинуть границу водоема от его действительного уреза (рис. 51). Для сравнительно небольших рек и каналов, когда необходимо учитывать взаимодействие фильтрационных потоков между различными берегами, кроме того, должно учитываться сопротивление между берегами, которое характеризуется эквивалентной длиной потока ΔL^0 [32, 36].

При двухслойном строении ложа водоема величины ΔL и ΔL^0 определяются следующими выражениями:

$$\Delta L = \frac{1}{b} \operatorname{ctg} \frac{bB}{2}; \quad \Delta L^0 = \frac{1}{b} \operatorname{sh} (bB); \quad b = \sqrt{\frac{k_0}{m_0 T}}, \quad (6.14)$$

где B — ширина реки; k_0 и m_0 — коэффициент фильтрации и мощность подстилающего (экранирующего) реку слоя; T — проводимость пласта. В этом случае, зная значения проводимости водонос-

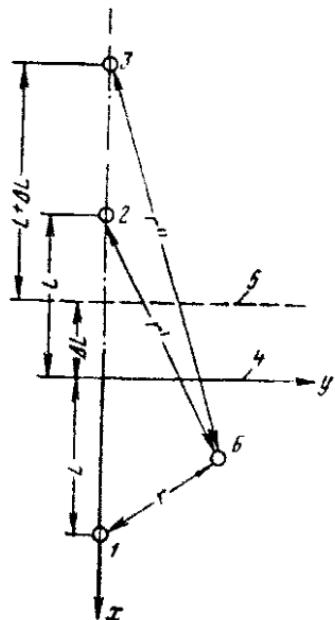


Рис. 51. Схема отражения скважины вблизи реки (водоема).

1 — центральная скважина; 2 — отражение центральной скважины без учета сдвига уреза реки; 3 — отражение центральной скважины с учетом сдвига уреза реки; 4 — линия уреза реки; 5 — сдвинутая линия уреза реки; 6 — расчетная точка

ного горизонта и величину ΔL , можно из формул (6.14) найти значения коэффициента перетекания и соответствующий ему коэффициент фильтрации экранирующего слоя k_0 .

Для упрощения такого решения целесообразно пользоваться данными табл. 20.

Таблица 20
Данные зависимости $\Delta L/B$ от bB

$\Delta L/B$	bB	$\Delta L/B$	bB	$\Delta L/B$	bB	$\Delta L/B$	bB
0,2	5	0,80	1,8	3	0,86	20	0,34
0,25	4,2	1,0	1,6	4	0,74	30	0,26
0,30	3,6	1,50	1,27	5	0,65	50	0,2
0,40	2,7	2,0	1,1	7	0,54	100	0,14
0,50	2,45	2,50	0,96	10	0,46		

Если $\frac{\Delta L}{B} < 0,2$, то $b \approx \frac{1}{\Delta L}$, а если $\frac{\Delta L}{B} > 100$, то $b = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2B}{\Delta L}}$.

Откачки вблизи реки (водоема) проводятся обычно из грунтовых вод, когда нестационарный поток формируется довольно сложным образом. Поэтому все излагаемые ниже методы расчета предназначены для обработки данных стационарного режима. Естественно, что до тех пор, пока влияние откачки не распространится до реки, обработку данных нестационарного режима можно проводить без ее учета. Кроме того, предполагается, что урез водоема в плане можно считать прямолинейным.

Для схемы водоема бесконечной ширины, которая может ис-

пользоваться в тех случаях, когда влияние откачки на противоположном берегу не сказывается (границы применимости этой схемы показаны ниже), используя теоретические решения задачи о работе источника — стока у линейной границы третьего рода [10, 14, 36], можно составить следующее выражение для понижения уровня в любой точке:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{r''}{r'} \right), \quad (6.15)$$

где величина \bar{r} определяется по данным табл. 21 в зависимости от $\delta = \frac{\Delta L}{r'}$.

Кроме того, через r' и r'' здесь обозначены расстояния до расчетной точки (наблюдательной скважины) от зеркального отра-

жения центральной скважины относительно уреза реки и линии уреза, сдвинутой на величину ΔL (см. рис. 51), т. е.

$$r' = \sqrt{(L+x)^2 + y^2}, \quad r'' = \sqrt{(L+x+2\Delta L)^2 + y^2}. \quad (6.16)$$

В частности, для точек, расположенных на оси x (по створу центральной скважины),

$$r' = L + x; \quad r'' = L + x + 2\Delta L, \quad (6.16a)$$

а для центральной скважины

$$r = r_c, \quad r' = 2L; \quad r'' = 2(L + \Delta L). \quad (6.16b)$$

Для откачки у реки ограниченной ширины расчетная формула понижения уровня может быть представлена в виде [14]

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{r'}{r} + \xi R_0 \right), \quad (6.17)$$

где величина R_0 зависит от значений $\bar{B} = \frac{B}{L}$ и $\bar{L} = \frac{\Delta L}{L}$, а ξ от значений \bar{L} , $\bar{x} = \frac{x}{L}$ и $\bar{y} = \frac{y}{L}$; расчетные значения R_0 и ξ , полученные по данным моделирования [14], приведены в табл. 22 — 24, причем значения ξ получены для характерных створов — по оси x (табл. 23) и по оси y при $x = L$ (табл. 24)

Таблица 22

Значения функции $R_0(\bar{B}, \bar{L})$

\bar{L} \ \bar{B}	0	0,5	1	5	10	20	∞
0,05	0,05	0,095	0,095	0,095	0,095	0,095	0,095
0,1	0,1	0,14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
0,2	0,175	0,24	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
0,3	0,245	0,40	0,458	0,482	0,482	0,482	0,482
0,5	0,355	0,48	0,55	0,58	0,62	0,62	0,62
1	0,58	0,79	0,9	1,15	1,19	1,19	1,19
5	1,61	1,83	2,01	2,64	2,85	2,96	2,96
10	2,26	2,49	2,65	3,35	3,62	3,84	3,98
20	2,99	3,29	3,47	4,18	4,5	4,77	5,12
30	3,68	4,00	4,16	4,88	5,2	6,52	6,78
50	4,45	4,82	4,97	5,72	6,1	6,52	6,78
100	5,54	6,03	6,22	6,99	7,35	7,69	8,10

Анализ значений R_0 показывает, что максимальная погрешность ϵ_p при учете влияния ширины реки может быть оценена по соотношению $\epsilon_p = 0,15 \frac{\Delta L}{B}$, т. е. при $\epsilon_p = 0,05 — 0,1$ схема бесконечной ширины реки применима, если $B > (1,5 — 3) \Delta L$. Кроме того, при $B > 10L$ и любых значениях \bar{L} максимальная погрешность оценивается соотношением $\epsilon_p = \frac{L}{B}$, откуда, задавая $\epsilon_p = 0,05 — 0,1$, получим другое условие применимости бесконечной ширины реки: $B > (10 — 20)L$.

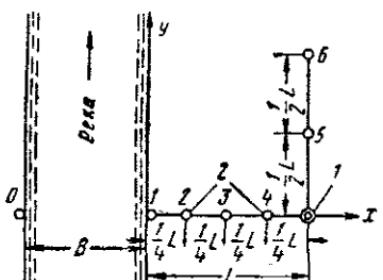
Таблица 23

Значения функции $\xi(\bar{x}, \bar{L})$

\bar{L}	0,25	0,5	0,75	1
0,3	0,83	0,74	0,62	0,53
1	0,86	0,76	0,68	0,6
2	0,88	0,81	0,74	0,68
3	0,9	0,83	0,77	0,72
5	0,92	0,86	0,81	0,77
10	0,94	0,87	0,84	0,81
20	0,95	0,91	0,87	0,84
50	0,96	0,94	0,91	0,89
100	0,97	0,95	0,93	0,92

Для оценки сопротивления ложа водоема весьма эффективно использование данных наблюдений за естественным режимом в прибрежной зоне до проведения откачки, наличие которых позволяет существенно упростить методику обработки данных опытной откачки.

а



б

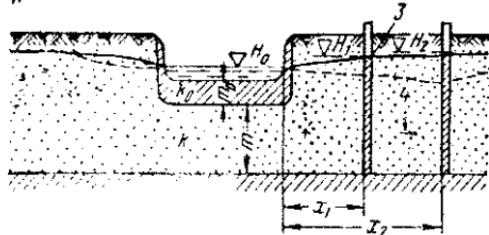


Рис. 52. Расположение опытного куста скважин вблизи водоема.

а — план опытного куста; б — разрез водоносного горизонта и ложа реки; 1 и 2 — центральная и наблюдательные скважины, 3 и 4 — кривые депрессии при естественном режиме и при откачке

на прямолинейном участке реки по створу нормально к урезу водоема (рис. 52, а), при этом одну скважину рекомендуется располагать на расстоянии, примерно равном мощности водоносного пласта, а другую — на расстоянии 50—100 м от первой *.

Таблица 24

Значения функции $\xi(\bar{y}, \bar{L})$

\bar{L}	0	0,5	1,0
0,3	0,53	0,48	0,38
1	0,6	0,57	0,49
2	0,68	0,64	0,57
3	0,72	0,69	0,63
5	0,77	0,75	0,70
10	0,81	0,79	0,75
20	0,84	0,83	0,8
50	0,89	0,88	0,85
100	0,92	0,9	0,89

* Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [14].

Замеряя уровни H_1 и H_2 в наблюдательных скважинах и уровень в реке (водоеме) H_0 , определим величину ΔL по формуле

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_0}{H_2 - H_1} (x_2 - x_1) - x_1. \quad (6.18)$$

После этого, используя выражение (6.15), по данным стационарного понижения уровня s в любой точке (наблюдательной скважине) определяется проводимость пласта по формуле

$$T = 0,366 \frac{Q}{s} \lg \left(\frac{r''}{r'} \right), \quad (6.19)$$

где величина \bar{r} находится из табл. 21, а расстояния r' и r'' рассчитываются согласно (6.16).

Для рек небольшой ширины величину ΔL при сравнительно симметричном естественном потоке также можно определять по формуле (6.18), а для оценки величины ΔL^0 , характеризующей сопротивление между берегами, можно воспользоваться табл. 25, построенной по формулам (6.14) для схемы двухслойного строения ложа водоема (рис. 52, б).

Таблица 25
Данные зависимости $B/\Delta L$ от $\Delta L^0/\Delta L$ и $\Delta L/B$

$B/\Delta L$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
$\Delta L^0/\Delta L$	0,21	0,46	0,75	1,07	1,46	
$\Delta L/B$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
$\Delta L/\Delta L^0$	0,013	0,062	0,13	0,212	0,4	0,685

После определения параметров ложа водоема (ΔL и ΔL^0) по данным режимных наблюдений, используя данные табл. 25, находится расчетная величина ширины реки B , которая может не быть равной геометрической ширине реки, поскольку строение ложа реки может отличаться от принятой типовой схемы двухслойного строения. Если же по данным режимных наблюдений определена только величина Δh , то в качестве расчетной величины B принимается геометрическая ширина реки. Значения проводимости пласта определяются далее по понижениям в створе скважины (ось x при $y = 0$) и в створе $x = L$ согласно (6.17) по формуле

$$T = 0,366 \frac{Q}{s} \left(\lg \frac{r'}{r} + 0,435 \xi R_0 \right). \quad (6.20)$$

Обработка откачки при отсутствии режимных наблюдений. Когда значение ΔL заранее определить не удается, расчетные параметры можно найти по данным об уровнях в двух наблюдательных скважинах при откачке. Для водоема неограниченной ширины с этой целью предварительно составляется выражение для соотношения понижений в двух точках, располагаемых на расстояниях r ,

и r_n от центральной (соответственные значения r' и r'' будут r'_1 , r''_1 и r'_n , r''_n), которое согласно уравнению (6.15) будет

$$\frac{s_i}{s_n} = \frac{\lg \left(\frac{r'_1}{r_i} \frac{r_i}{r'_n} \right)}{\lg \left(\frac{r'_n}{r_n} \frac{r_n}{r'_1} \right)}, \quad (6.21)$$

где r'_1 и r'_n — определяются по табл. 21 соответственно при $r' = r'_1$ и $r' = r'_n$.

Определение ΔL по формуле (6.21) производится подбором; для упрощения расчетов можно пользоваться расчетной табл. 26, в которой дана зависимость отношений $s_{in} = \frac{s_i}{s_n}$ от величины $\bar{L} = \frac{\Delta L}{L}$ в точках с номерами i и n ; причем выбраны такие пары скважин, где эта зависимость являлась достаточно хорошо выраженной, поэтому наблюдательные скважины рекомендуется располагать именно в этих точках, как показано на рис. 52, a. Зная соотношения величин понижений в двух скважинах на установившийся период откачки, по табл. 26 можно определить величины \bar{L} и $\Delta L = \bar{L} \cdot L$. После этого по формуле (6.20) для любой скважины вычисляют проводимость T .

Таблица 26
Данные по соотношению величин понижений в расчетных точках

\bar{L}	0,1	0,3	0,5	0,7	1	2	4	6	10	20	
$s_{1,2}$	0,039	0,296	0,525	0,656	0,71	0,79	0,868	0,93	0,94	0,962	0,97
$s_{1,3}$	0,018	0,182	0,333	0,448	0,518	0,60	0,76	0,825	0,84	0,893	0,927
$s_{1,4}$	0,01	0,089	0,212	0,3	0,365	0,436	0,515	0,68	0,705	0,78	0,835
$s_{2,3}$	0,264	0,32	0,405	0,86	0,51	0,56	0,66	0,743	0,76	0,815	0,86
$s_{3,4}$	0,565	0,595	0,64	0,675	0,7	0,725	0,755	0,785	0,845	0,875	0,905
$s_{1,1}$	0,51	0,67	0,74	0,77	0,80	0,82	0,815	0,885	0,894	0,914	0,925

При необходимости учета конечной ширины реки в общем случае расчеты можно провести подбором, составив выражение для соотношения понижений в двух точках, исходя из выражения (6.17). Для двух характерных пар точек ($0 — 1$ и $1 — 3$), в которых рекомендуется располагать наблюдательные скважины (см. рис. 52, a), для определения величин ΔL можно воспользоваться графиками, представленными на рис. 53.

После определения величины ΔL значение проводимости пласта рассчитывается по формуле (6.20).

Кроме того, следует также отметить, что во всех случаях величина проводимости пласта T может быть с достаточной точностью

оценена и без учета сопротивления ложа реки (т. е. при стационарном режиме — по формуле Дюпон), если имеются данные о понижениях уровня по двум скважинам, расположенным параллельно реке (при $x = L$) и находящимся на расстоянии от центральной скважины $y \ll 0,5L$, поскольку величины ξ для таких скважин будут отличаться весьма незначительно.

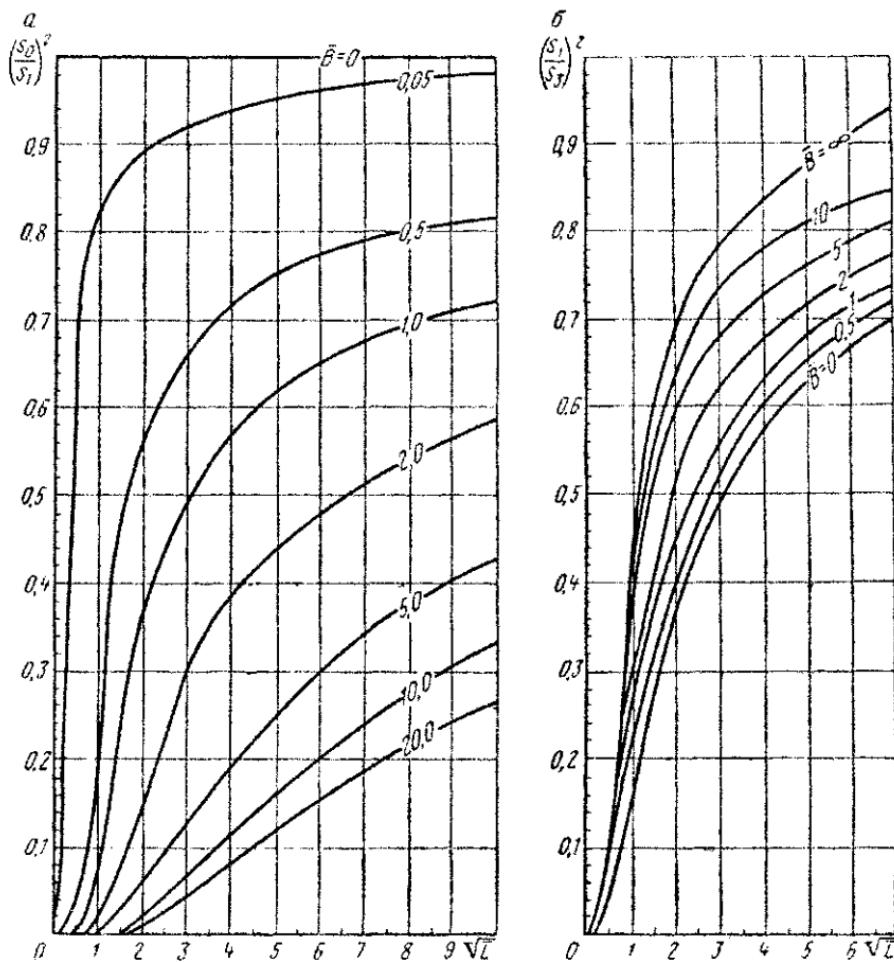


Рис. 53. Расчетные графики для определения \bar{L} по соотношениям понижений в наблюдательных скважинах при различных значениях \bar{B} :
а — для точек 9 и 10; б — для точек 1 и 2

После определения величины T можно провести обобщенный расчет ΔL , используя данные по всем скважинам, располагаемым по двум основным лучам. Для этого по каждой скважине находится величина $\xi R_0 = \frac{2\pi TS}{Q} - \ln \frac{r'}{r}$ и строится экспериментальный график

зависимости ξR_0 от относительного расстояния \bar{x}_0 до центральной скважины. Причем для скважин, расположенных на створе, параллельном реке, $\bar{x}_0 = 1 + \bar{y}$, а на створе, расположенному нормально реке, $\bar{x}_0 = \bar{x}$. Экспериментальный график совмещается с эталонным графиком зависимости ξR_0 от \bar{x}_0 , построенным по табл. 22—24 при известном \bar{B} и различных \bar{L} . По наилучшему совмещению графиков находится величина \bar{L} . После ее определения уточняется величина проводимости.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что изложенные способы расчета применимы в тех случаях, когда урез реки в зоне влияния откачки можно считать прямолинейным. В тех же случаях, когда урез реки имеет существенно криволинейный характер, для обработки откачки может быть использовано моделирование на бумажной модели ЭГДА [36].

Глава III

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

§ 1. ОПЕРЕЖАЮЩЕЕ ОПРОБОВАНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Опережающее опробование входит в комплекс экспресс-методов опробования водоносных пород в процессе бурения рыхлых отложений. После остановки проходки скважины и извлечения бурового инструмента фильтр-опробователь спускается в скважину с глинистым раствором и затем гидроподмывом вводится в испытуемый водоносный горизонт. При этом глинистый раствор экранирует сверху водоносный горизонт. Последующей откачкой обеспечивается получение данных о расходе и понижении уровня и, следовательно, точечное опробование вскрываемых пород.

Опытные работы опережающим способом можно осуществлять с применением фильтра-опробователя промывочного или шнекового типа, однако в серийно изготавливаемый комплекс опережающего опробования входит фильтр-опробователь промывочного типа, поэтому все последующие рекомендации относятся к проведению работ и обработке опытных данных с фильтром-опробователем, устанавливаемым гидроподмывом.

При опережающем способе опробования водоносных пластов фильтр-опробователь путем расходки бурового снаряда или его вращения с одновременным нагнетанием через бурильные трубы чистой воды вводится в водоносный пласт, представленный песками с примесью гальки и гравия, а также небольшими по мощности прослойками более плотных пород. На рис. 54 приведены схемы применения опережающего опробования с использованием фильтра шнекового типа, серийно изготавливаемого фильтра промывочного типа и показана схема откачки через бурильные трубы эрлифтом, поршневым и вороночным насосами.

В комплекс опережающего опробования входит: фильтр-опробователь, водоподъемное оборудование, пневматический уровнемер и вспомогательное оборудование [55].

Фильтр-опробователь включает буровой наконечник — сопло, армированный пластинками твердого сплава, собственно сетчатый фильтр диаметром 50 или 63,5 мм, соединительную пробку с внутренним отверстием без нарезки и систему кольцевого, обратного и скользящего клапанов [55].

Для ускорения процесса введения в водовмещающие породы фильтр снабжен буровым наконечником гидромониторного типа.

При этом, если пески не содержат твердых прослоев пород или гравия, то достаточно нагнетания через бурильные трубы чистой воды и легкой расхадки инструмента; если в испытуемом пласте имеются прослои песчаника, глины или гравия, то их разрушают вращением снаряда. В этом случае наконечник работает как гидромониторное двухперое долото. Серийно изготавляемый комплект опережающего опробования имеет фильтр со скважностью около 15% с водоприменной поверхностью из сетки № 12/90.

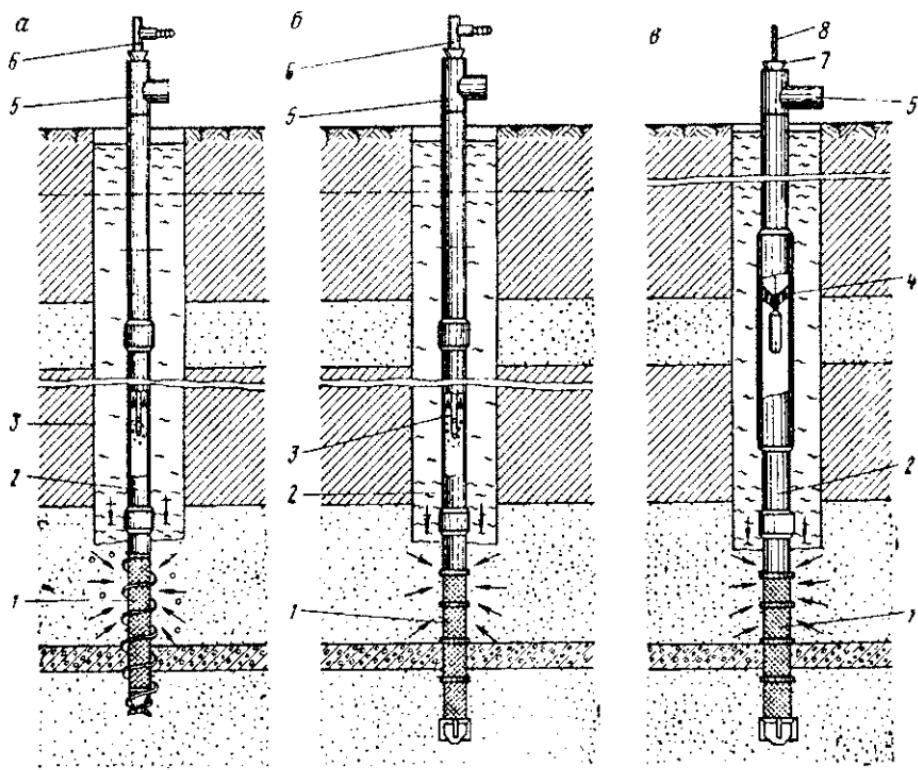


Рис. 54. Схема опережающего опробования.

а — с фильтром щелевого типа; б — с фильтром промывочного типа; в — схема откачки и поршневым насосом. 1 — фильтр-опробователь; 2 — бурильные трубы; 3 — воздушные трубы эрлифта; 4 — поршень типа Листство (сваб); 5 — тройник для слива воды; 6 — тройник на воздушной линии с уплотнительной пробкой; 7 — уплотнение, 8 — трос

При опробовании водоносных горизонтов с высоким положением уровней подземных вод наиболее простым и эффективным водоподъемником является эрлифт, при низких уровнях (ниже 50 м от устья) — глубинный поршневой насос.

При эрлифтном водоподъеме может быть использован любой компрессор производительностью не менее $0,15 \text{ м}^3/\text{мин}$ при давлении 5—7 атм. Для этой цели могут быть использованы тормозные компрессоры автомобилей МАЗ, ЗИЛ, стационарные компрессоры типа М-155, а также имеющиеся в геологических организациях

передвижные компрессоры для производства откачки ЗИФ-55, ЗИФ-ВКС-5, КС-9 и др.

При выборе диаметра воздушных труб и глубин их загрузки целесообразно пользоваться графиком, приведенным на рис. 55, и табл. 27.

Исходные данные для расчета параметров водоносных пластов, опробуемых опережающим методом, получают аналогично результатам опытных откачек из одиночных скважин. Дебит откачки определяют объемным методом, динамика изменения уровня в ходе откачки и после ее остановки (восстановление уровня) фиксируется с применением пневматического уровнемера (ПУР), входящего в комплект опережающего опробования.

При проведении работ по опробованию водоносных горизонтов не требуется существенно изменять технологию бурения.

После вскрытия пластов, намечаемых к опробованию, бурение прекращают, промывают скважину качественным глинистым раствором, затем буровой наконечник поднимают на поверхность. С помощью тех же бурильных труб на забой скважины опускают подготовленный к работе фильтр-опробователь. По колонне бурильных труб к фильтру-опробователю подается вода, и он вводится в пласт расходкой.

Фильтр должен погружаться в пласт на 30—40 см больше своей длины. После погружения фильтра в пласт в бурильных трубах замеряют уровень воды, в зависимости от глубины которого выбирают способ водоподъема. О качестве изоляции фильтра от раствора в скважине можно судить по уровню воды в бурильных трубах. При недостаточной изоляции фильтра-опробователя от глинистого раствора из бурильных труб обычно происходит излив закачиваемой воды, так как ее удельный вес меньше удельного веса раствора в скважине. В таких случаях опыт повторяется.

При соблюдении указанных требований откачка через бурильные трубы не обеспечивается достаточным притоком только при

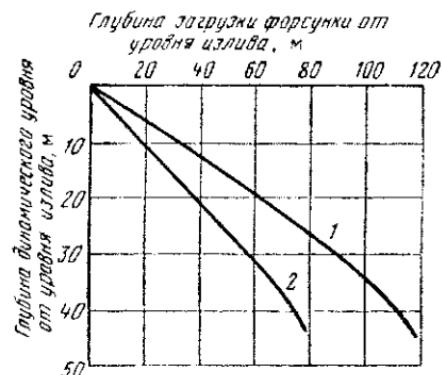


Рис. 55. Зависимость глубины загрузки смесителя от положения динамического уровня.

1 — оптимальная загрузка; 2 — допустимая минимальная загрузка

Таблица 27
Данные о производительности компрессора при откачке эрлифтом при опережающем опробовании

Диаметр бурильных труб, мм	Наружный диаметр воздушных труб, мм	Примерная производительность компрессора, м ³ /мин
50,0	14—18	0,15—0,25
60,3	16—24	0,25—0,50
63,5	16—22	0,25—0,50
73,0	20—30	0,5—1,00

исследовании пластов безводных или с очень низкими фильтрационными свойствами.

Обычно же при опережающем опробовании получают данные о расходе Q откачки, соответствующее понижение уровня при стабилизации s_0 и изменение понижения уровня в ходе откачки, а также сведения о восстановлении уровня после ее прекращения. Эти данные могут быть использованы при расчетах коэффициента фильтрации опробуемых пород.

Специфика опробования опережающим методом заключается в том, что откачка производится обычно из скважины гидродинамически несовершенной по степени и характеру вскрытия пласта, а так как расход откачки невелик и, следовательно, зона возмущения пласта также незначительна по размерам, это предопределяет необходимость обязательного учета несовершенства опытной скважины по степени и характеру вскрытия пласта.

Таблица 28
Потери напора в бурильных трубах в зависимости от откачиваемого расхода воды

Расход воды, л/сек	Потери напора Δs (в м) в бурильных трубах длиной 4,5 м
0,05	0,01
0,10	0,03
0,20	0,08
0,30	0,21
0,40	0,70
0,50	1,06

Поскольку длина фильтра-опробователя обычно не превышает 1 м, при обработке опытных данных, как правило, с достаточной точностью может быть использована формула Н. Н. Велигина [25] для притока к скважине, вскрывающей пласт бесконечно большой мощности. В соответствии с этим коэффициент фильтрации пласта может быть рассчитан по формуле

$$k = \frac{0,366Q \left(\lg \frac{1,47l}{\epsilon s_0} + \zeta_{2\phi} \right)}{ls_p}, \quad (1.1)$$

где ϵ — коэффициент, зависящий от положения фильтра в пласте; $\epsilon = 1$, если фильтр касается кровли или подошвы пласта, $\epsilon = 2$ — при расположении фильтра внутри пласта; $\zeta_{2\phi}$ — показатель сопротивления сетчатого фильтра, находящегося в контакте с породой; s_p — расчетное понижение уровня (определяется как разность величины понижения в трубах s_0 и величины гидравлических потерь Δs в трубах)

$$s_p = s_0 - \Delta s. \quad (1.2)$$

Величина Δs может оцениваться с использованием табл. 28, в которой приведены величины потерь давления в зависимости от откачиваемого расхода.

Для определения величины гидравлических потерь на пути от фильтра-опробователя до датчика уровня в трубах длиной L м необходимо табличное значение Δs умножить на число труб в снаряде.

Величина сопротивления фильтра $\zeta_{2\phi}$ зависит от скважности каркаса опробователя, типа сетки и состава контактирующих с фильтром пород, причем в некоторых случаях гидравлические потери на фильтре оказываются соизмеримыми с потерями напора в пласте. Очевидно, что для получения характеристики фильтрационных свойств опробуемых пород необходимо знать величину $\zeta_{2\phi}$ и учитывать ее при оценке коэффициента фильтрации.

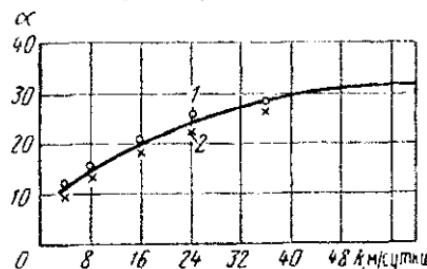


Рис. 56. График зависимости α от коэффициента фильтрации пород для фильтра-опробователя с сеткой № 12/90.

1 — при $l = 1$ м; $r_0 = 0,03$ м; $\epsilon = 1$; 2 —
при $l = 1$ м; $r_0 = 0,03$ м; $\epsilon = 2$

Таблица 29
Значения показателя сопротивления фильтра-опробователя в зависимости от коэффициента фильтрации пород

Коэффициент фильтрации опробуемых пород, м/сутки	Показатель сопротивления фильтра $\zeta_{2\phi}$
До 5	1,5
5—10	2,3
10—20	4,3
20—40	6,0
40—60	6,2
60—80	6,4
80—100	6,5

Для определения величины $\zeta_{2\phi}$ были проведены лабораторные работы в напорном радиальном лотке с моделями сетчатых фильтров со скважностью серийного фильтра-опробователя 12,4 %. Опыты проводились в песках с d_{50} от 0,14 до 2 мм, а также с различными моделями фильтров диаметром от 22 до 100 мм с сетками галунного плетения № 8/70, 12/90 и 18/130. В ходе опытов оценивалась величина сопротивления фильтра.

Результаты лабораторных работ показали значительное влияние сопротивления сетчатого фильтра-опробователя на величину понижения уровня. Проверочные исследования в полевых условиях на кустах скважин подтвердили правильность выводов о необходимости учета величины $\zeta_{2\phi}$ при обработке данных опережающего опробования. В практических расчетах могут использоваться графики, приведенные на рис. 56, или $\zeta_{2\phi}$ табл. 29, в которой даны значения показателя сопротивления стандартного фильтра-опробователя в зависимости от коэффициента фильтрации пород пласта.

Для стандартного фильтра-опробователя длиной 1 м и диаметром 60 мм с водоприемной поверхностью из сетки галунного плетения № 12/90 величина коэффициента фильтрации может быть рассчитана по формуле

$$k = \alpha q, \quad (1.3)$$

где q — удельный дебит при проведении опробования, а величина α определяется по графику (см. рис. 56) для случаев расположения фильтра-опробователя у кровли или подошвы пласта либо

в средней части водоносного горизонта. Значения a получены с использованием величины сопротивлений фильтров, рассчитанных на основе гидравлических исследований. При вычислении коэффициента фильтрации по данным опережающего опробования сначала приближенно рассчитывается коэффициент фильтрации пласта по формуле Н. Н. Веригина, затем оценивается a при приближенном значении k и уточняется коэффициент фильтрации водоносных пород при полученной величине a по формуле (1.3).

Пример расчета. При опережающем опробовании пласта мощностью 12 м, залегающего на глубине 250 м, определен дебит откачки $Q = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ при понижении уровня $s_0 = 3 \text{ м}$. Датчик пневматического уровнемера был опущен на глубину 50 м. Работа осуществлялась серийным комплектом опережающего опробования. Расчеты ведутся в следующей последовательности:

$$1. \text{ Уточняется величина понижения уровня } s_p = s_0 - \Delta s; \quad \Delta s = \beta \frac{L}{1000} + \Delta s_\phi = \\ = \frac{0,19 (250 - 50)}{1000} + 0,004 = 0,038 + 0,004 = 0,042 \text{ атм} = 42 \text{ см.}$$

Здесь β — величина гидравлических потерь в трубах при расходе $Q = 0,28 \text{ л/сек}$, равная 0,19 (см. табл. 28). Отсюда $s_p = 2,58 \text{ м}$.

2. Определяем приближенное значение коэффициента фильтрации пласта по формуле (1.1)

$$k = 4,8 \text{ м/сутки.}$$

3. Принимая величину a по графику рис. 56 равной 1,13, получаем согласно формуле (1.1) при удельном дебите скважин $q = 9,3 \text{ м}^3/\text{сутки}$ $k = 10,5 \text{ м/сутки}$.

Более точно величина k может быть рассчитана методом последовательных приближений [24] из уравнения

$$ls_p k = 0,366Q \left(\lg \frac{1,47l}{\varepsilon r_0} - a_1 - b \lg k \right), \quad (1.4)$$

где a_1 и b — коэффициенты, определяемые в зависимости от типов фильтровых сеток [4].

Представив это уравнение в виде двух уравнений, строят кривые $F_1(k)$ и $F_2(k)$

$$F_1(k) = ls_p k; \quad (1.5)$$

$$F_2(k) = 0,366Q \left(\lg \frac{1,47l}{\varepsilon r_0} - a_1 - b \lg k \right). \quad (1.6)$$

Их пересечение дает более точное значение k .

Проверка точности рассматриваемой методики определения коэффициента фильтрации по данным опережающего опробования производилась контрольными исследованиями на опытных кустах скважин.

Опытные откачки осуществлялись вблизи г. Краснодара на кусте скважин, каптирующих аллювиальные отложения с коэффициентом фильтрации 10—12 м/сутки, и в Солнечногорской партии ВСЕГИНГЕО, где опробовались межморенные пески с коэффициентом фильтрации 1,5—2 м/сутки. Наблюдательные скважины находились на расстоянии от 2 до 15 м от центральной, в которой

производилось опережающее опробование. Глубина залегания водоносных горизонтов достигала 65 м от поверхности земли. Коэффициент фильтрации, рассчитанный по данным опережающего опробования, сравнивался с величиной, полученной по данным откачек с двумя наблюдательными скважинами как при проведении опережающего опробования, так и при контрольных кустовых откачках.

Коэффициент фильтрации по данным опережающего опробования на всех опытных кустах определялся в первом приближении, т. е. величина сопротивления ζ_2 принималась при величине k , рассчитанной без учета несовершенства скважины по характеру вскрытия пласта и методом последовательных приближений [23]. Коэффициент фильтрации по двум наблюдательным скважинам рассчитывался по формуле Дюпюи и с использованием данных снижения — восстановления уровня. В ходе опробования получали значения коэффициентов фильтрации, соответствующие различным интервалам опробуемых песков.

В результате опытных работ установлено, что применение метода последовательных приближений при обработке данных опережающего опробования позволяет получить значения коэффициента фильтрации, весьма близкие к значениям k по данным откачки с двумя наблюдательными скважинами (отклонения не превышали 10%). Следовательно, значения параметров, получаемые при опережающем опробовании в пределах возмущенной зоны пласта, можно считать вполне достоверными.

В связи с применением опережающего опробования при предварительных исследованиях существенный интерес представляет сопоставление достоверности получаемых результатов с данными обычно применяемых в настоящее время на этой стадии кратковременных пробных и длительных откачек из одиночных скважин. Такое сравнение произведено Л. И. Рохлиным [48]. Для анализа достоверности значений коэффициентов фильтрации методами математической статистики были использованы данные проведения опережающего опробования в 74 скважинах, пробуренных несколькими гидрогеологическими партиями Рязанской, Ростовской и Краснодарской комплексных геологических экспедиций.

На основе проведенного анализа установлено, что в 74 скважинах среднее значение коэффициента фильтрации разнозернистых песков определено с достоверностью 72—74%.

Опережающее опробование водоносных пластов в процессе проходки рыхлых пород широко используется в гидрогеологических партиях и экспедициях Министерства геологии СССР и во многих других организациях. При этом для производства опробования применяются различные модификации оборудования. В Южно-Каракумской гидрогеологической экспедиции в Туркмении метод опережающего опробования используется главным образом для определения химического состава подземных вод. Для этих целей в качестве водоподъемных средств при опробовании слабопрони-

циемых водоносных горизонтов применяется вороночный насос и оттартирование [6]. Опыт послойного опробования водоносных пород на глубинах до 300 м с серийным комплектом накоплен в Волгоградской комплексной геологической экспедиции (2-е ГГУ и др.).

Применение опережающего способа сдерживается в определенной мере отсутствием надежного и простого прибора для замера величины понижения уровня при эрлифтной откачке через бурильные трубы. Анализ данных применения опережающего способа в различных организациях показал, что в большинстве из них он используется только при качественной оценке водоносных пластов. Случаи заклинивания снаряда, обвалов пород и иные осложнения редки.

Метод опережающего опробования дополняет другие виды опытно-фильтрационных исследований. Его полезно применять в процессе бурения скважин на ранних стадиях изысканий, а также при детальных изысканиях для получения массовой информации о проницаемости водоносных пластов. При этом следует учитывать, что это только проницаемость в одной точке, тогда как по данным длительных кустовых откачек определяется осредненная проницаемость более значительного объема водоносного пласта. Однако при проведении массовых опытов опережающим методом опробования наряду с кустовыми откачками можно будет во многих случаях путем сопоставления и корреляции результатов, получаемых по тому и другому методу, сократить число длительных опытно-фильтрационных исследований.

Метод опережающего опробования целесообразно применять при бурении скважин на воду, когда в разрезе встречается несколько водоносных горизонтов. Можно рекомендовать также применение опережающего опробования в комплексе с геофизическими методами исследований, что повышает качество и достоверность геологической и гидрогеологической документации при разведочном и поисковом бурении скважин.

§ 2. ИСПЫТАТЕЛИ ПЛАСТОВ

Одним из наиболее перспективных методов опробования водоносных пластов в процессе бурения и при оценке зональной проницаемости горизонтов является опробование с использованием пластоиспытателей.

Пластоиспытатели применимы при производстве опробования пластов, приуроченных к устойчивым породам, в ходе проходки скважины и по окончании бурения под защитой обсадной (фильтровой) колонны.

Испытатели пластов представляют собой компоновку бурового снаряда из клапанных узлов и пакера, позволяющую изолировать исследуемую зону пласта от давления воды в скважине и влияния других пластов с целью фиксирования процесса притока в трубы и изменения пластового давления.

В простейшем виде испытательный снаряд включает: хвостовик-фильтр, резиновый пакер, клапанный узел и бурильные трубы. После спуска такого снаряда на забой под весом бурильных труб пакер разжимается и изолирует подпакерную зону скважины от вышележащего промывочного раствора и других водоносных пластов.

Открытием клапанного узла обеспечивается доступ жидкости из-под пакерной зоны в бурильные трубы. В зависимости от величины пластового давления и фильтрационных свойств водовмещающих пород наблюдается различный по интенсивности процесс притока пластовой жидкости в трубы. При пластовом давлении, превышающем гидростатическое давление столба воды в трубах, можно получить излив (фонтанирование) жидкости на поверхности после распакеровки скважин.

Процесс притока воды в бурильные трубы и характер изменения давления под пакером фиксируют с помощью глубинных самопишуших манометров.

Пластоиспытатели получили широкое применение в практике опробования скважин на нефть и газ, а также при бурении скважин на промышленные и минеральные воды. В настоящее время серийно выпускаются комплекты испытательных инструментов (КИИ) с набором узлов и приборов для исследования пластов в скважинах различных диаметров, глубин и в различных гидрологических условиях.

Комплекты испытательных инструментов КИИ-Гроз УфНИИ имеют три основных типоразмера:

КИИ-146 для скважин диаметром от 190 до 295 мм

КИИ-95 » » » » 118 » 161 »

КИИ-65 » » » » 75 » 112 »

Схема компоновки КИИ в скважине показана на рис. 57. После вскрытия пласта и проведения геофизических исследований в скважину опускается на бурильных трубах испытатель пласта одного из указанных типоразмеров в зависимости от диаметра скважины.

Фильтр устанавливается против испытуемого пласта, а пакер — в плотных породах над испытуемым пластом. За пакером опускают испытатель пластов с гидравлическим реле времени, выше — переходник и бурильные трубы из расчета, чтобы объем их пустой полости составлял 10—15% от объема той зоны скважины, которая ограничена пакером. Затем устанавливается система гидромеханических клапанов. Глубинные регистрирующие манометры помещают в фильтр и в переходники.

После установки снаряда на забое весом труб создают осевую нагрузку на пакер. Резиновый элемент пакера герметизирует часть скважины, расположенную ниже пакера. Через несколько минут после посадки пакера срабатывает реле времени и открывается впускной клапан. Вода проходит через фильтр, отверстие в штоке пакера и поступает в бурильные трубы.

Манометры в фильтре отмечают в момент открытия клапана резкое снижение давления, а затем его повышение по мере заполнения труб жидкостью [17, 33].

Время стояния на притоке зависит от состояния скважины и интенсивности притока и обычно колеблется от 20 мин до нескольких часов.

Затем снижают нагрузку на КИИ и поворачивают трубы ротором на 15—20 оборотов, приток в трубы прекращается, на нижних манометрах записывается конечная кривая восстановления давления.

После этого инструмент вывешивают, при этом выпускные клапаны закрываются, уравнительный клапан открывается и давление выравнивается до гидростатического, что облегчает снятие пакера и подъем инструмента из скважины.

Герметичность пакеровки проверяется по уровню промывочной жидкости в скважине. Если после открытия выпускного клапана уровень жидкости в скважине не падает, то пакеровка герметична. Интенсивность притока определяется по скорости вытеснения воздуха из труб в процессе притока. Для регистрации ее устанавливается газовый счетчик.

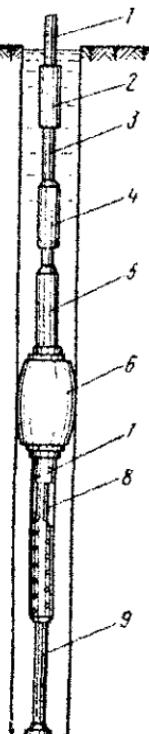
При подъеме снаряда из бурильных труб отбирают пробы жидкости на анализы, извлекают бланки глубинных манометров, обработка которых дает возможность приблизенно определить основные гидродинамические параметры пласта.

Для испытания интервала, находящегося значительно выше забоя, или для испытания одного пласта, когда скважиной уже вскрыто несколько пластов, применяют компоновку снаряда из серийных узлов КИИ с двумя пакерами [66].

Подавляющее большинство работ выполняется испытателями пластов КИИ-146. В последние годы успешно внедряется опробователь пластов с двумя пакерами ОПТС-8/10, получивший название «Саратовец» [38].

Рис. 57. Основные узлы испытательных инструментов типа КИИ-Грозд УфНИИ

1 — бурильные трубы;
2 — запорный клапан;
3 — узел с манометром;
4 — ИПГ 2-й сборки;
5 — ИПГ 1-я сборки;
6 — пакер;
7 — фильтр;
8 — манометр;
9 — хвостовик



Опробователь состоит из циркуляционного и предохранительного клапанов, двух пакеров, переводника с манометром и узла для отбора пробы. Расслабление пакеров осуществляется путем нагнетания воды через бурильные трубы и создания избыточного давления от бурового насоса или цементировочного агрегата.

Помимо использования регистрирующих манометров для получения сведений о гидродинамических характеристиках пластов мож-

но также производить откачку через бурильные трубы [56]. Для этого при сборке инструмента на необходимой глубине можно по методу Э. И. Аракеляна устанавливать поршневой насос, цилиндр и переводник для посадки нижнего клапана. Плунжер насоса и нижний клапан опускаются на тросе, который укрепляется на крючке вала подъемника [6].

Выпускаемые отечественной промышленностью комплексы испытательных инструментов для скважин на нефть и газ комплектуются пакерами из жесткой резины, что в большинстве случаев не позволяет создавать необходимые нагрузки для разжатия пакеров давления при бурении сравнительно неглубоких скважин на воду.

Поэтому применение КИИ целесообразно в скважинах глубоких (более 300—500 м) или в тех случаях, когда имеется возможность создать дополнительное давление на колонну труб от лебедки, с помощью гидросистемы бурового станка и т. д. [56].

ВСЕГИНГЕО разработан испытательный снаряд ИСВ для послойного опробования водонесущих горизонтов в процессе бурения скважин в устойчивых разрезах [56, 8].

Снаряд ИСВ состоит из хвостовика, цилиндрического секционного пакера, клапанных узлов и колонны водоподъемных труб. В хвостовике и бурильных трубах устанавливаются глубинные манометры (рис. 58). От испытателей пластов КИИ-Гроз УфНИИ для нефтяных и газовых скважин он отличается более простой конструкцией и меньшей жесткостью пакера.

Широкое сечение проходного канала в пакере позволяет помимо получения с помощью манометра диаграммы давлений производить также и откачуку воды из подпакерной зоны через бурильные трубы, как и при опережающем опробовании [8].

Для опробования неглубоких скважин применяется упрощенная компоновка снаряда — хвостовик-фильтр, пакер и трубы. Колонна труб, на которых опускают в скважину снаряд, может быть комбинированной (см. рис. 58, в).

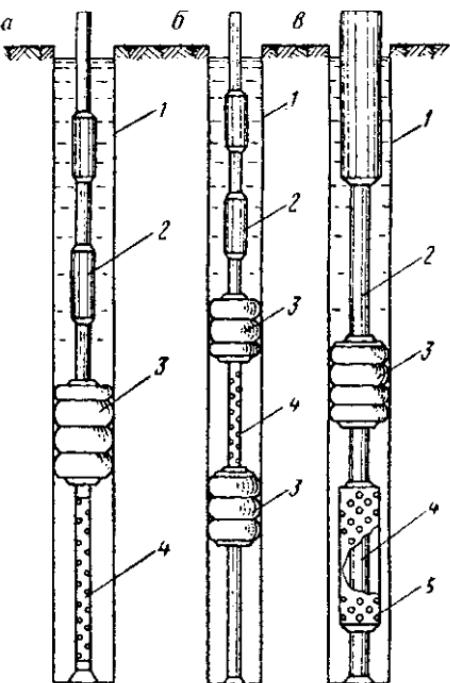


Рис. 58. Схемы применения снаряда ИСВ.

а — с одним пакером; б — с двумя пакерами; 1 — поплавковый клапан; 2 — узел с манометром; 3 — пакер; 4 — фильтр; в — упрощенная компоновка узлов снаряда для откачки из-под пакерной зоны; 1 — обсадные трубы; 2 — бурильные трубы; 3 — пакер; 4 — манометр; 5 — фильтр-хвостовик

Для этого снаряд опускается на бурильных трубах и лишь верхняя часть (в зависимости от глубины пьезометрического уровня) — обсадные трубы — для организации откачки. Применение такого снаряда сокращает время опытных работ, исключает необходимость закрепления скважины обсадными трубами и их цементирование.

Аналогичный снаряд СИП-3 разработан специалистами Волго-Донского геологического управления. Он состоит из фильтра, пакера, безопасного переводника, уравнительного клапана и комбинированной колонны — бурильные и обсадные трубы. Обычно с помощью СИП-3 проводят понтервальные откачки [9].

О схеме работы снаряда СИП-3 дает представление рис. 58, в. Результаты стендовых и опытных работ с пакерующими элементами, полученные ВСЕГИНГЕО, показывают, что при нагрузке до 2,5—3 т испытательный снаряд ВСЕГИНГЕО (ИСВ) можно применять в скважинах диаметром до 150 мм, в то время как серийные пакеры требуют в этих условиях нагрузок до 7 т [8, 56].

Снаряд ИСВ рекомендуется применять для испытания гидрогеологических скважин в процессе бурения в устойчивых разрезах по мере вскрытия водоносных горизонтов, однако пропущенные пластины можно опробовать и после проходки скважины по схеме снизу — вверх.

Помимо применения упрощенных типов испытательных снарядов с пакерующими элементами в последние годы для опробования водоносных горизонтов гидрогеологи все чаще начинают применять серийные приборы, разработанные для нефтяных и газовых скважин. В значительной степени это вызвано ростом глубин гидрогеологических скважин.

В этом отношении значительный опыт применения испытаний пластов имеется в организациях, выполняющих буровые работы на минеральные, термальные и промышленные воды, а также в геологических управлениях, выполняющих изыскания для захоронения промстоков.

При бурении гидрогеологических скважин, средние глубины которых не превышают 200 м, опыт использования испытателей невелик, но несомненно этот метод опробования водоносных горизонтов в устойчивых породах имеет большие перспективы.

Одно из существенных достоинств опробования с применением пластоиспытателей — обеспечение условий мгновенного возбуждения пласта в результате создания резкой депрессии после разобщения скважины пакером и открытия системы клапанов. Мгновенный перепад давления в призабойной зоне скважины достигает в отдельных случаях 250 кгс/см² и может регулироваться путем долива жидкости в трубы. Работа пластоиспытателя в этом отношении аналогична эффекту метода имплозии, используемому при освоении скважин.

Для качественного опробования глубокозалегающих водоносных горизонтов возможно применение опробователей пластов на кабеле, кабель-тросе или бросаемых внутрь трубах.

В СССР первые промышленные образцы опробователей пластов на кабеле разработаны Волго-Уральским филиалом ВНИИГеофизики.

Каротажные опробователи пластов конструкции ВУФ ВНИИГеофизики обеспечивают герметизацию участка отбора пробы на определенной глубине, испытание в одной точке пласта и подъем пробы на поверхность с сохранением в ней пластового давления.

В последние годы ВУФ ВНИИГеофизики разработан опробователь пластов, в котором применен электродвигатель и система прямой механической передачи (с выдвижной лапой), что обеспечивает сравнительно высокую надежность работы прибора.

ВУФ ВНИИГеофизики разработан специальный гидрогеологический опробователь пластов [13] — ОПГ, предназначенный для отбора герметичных проб жидкости и газа из пластов. С его помощью можно определить также статический уровень исследуемого пласта. Разработано два типа таких опробователей: ОПГ-7-10 и ОПГ-4-5 для работы в скважинах глубиной от 50 до 1000 м диаметром от 70 до 270 мм. Приборы типа ОПГ рассчитаны для работы с трехжильным каротажным кабелем и серийной каротажной станцией типа АКС.

Прибор ОПГ состоит из глубинного прибора и наземных пультов, обеспечивающих управление его работой в скважине, а при использовании глубинных датчиков — регистрацию характеристики процесса отбора пробы.

После отбора пробы производят анализ жидкости и газа, измеряют давление в баллоне, которое является показателем и контролем качества работы прибора.

Анализ полученного графика изменения давления в точке отбора характеризует качество работ, позволяет определить время наполнения баллона и пластовое давление с точностью до 1—2%.

При бурении скважин на воду опробователи пластов на кабеле целесообразно применять для детализации проходимого разреза.

Институтами ВНИИБТ и УфНИИ разработаны опробователи для исследования пластов без подъема бурового инструмента на поверхность [66].

Опробование водоносных пластов с применением пластиоиспытателей может производиться в трех вариантах: 1) путем проведения откачки после установки измерительных инструментов в скважине через бурильные трубы с фиксированием изменения забойного давления и расхода откачки на поверхности земли; 2) определением нарастания суммарного притока в бурильные трубы и изменения давления в подпакерной зоне испытателя пластов на трубах; 3) определением нарастания давления и притока в испытатель пласта на кабеле.

Если через пластиоиспытатель производится откачка, то данные этих откачек при известном расходе и показаниях забойного

манометра обрабатываются по методике, аналогичной расчету параметров по данным опережающего опробования с учетом несовершенства скважины [4].

Диаграмма давления под пакером, полученная глубинным манометром, требует специальных методов интерпретации. Количественная интерпретация участка кривой восстановления давления осложняется тем, что при поступлении жидкости в пустые бурильные трубы приток в скважину будет все время уменьшаться, до тех пор, пока гидростатическое давление столба жидкости не уравновесит пластовое давление. Следовательно, для обработки экспериментальных данных необходимо знать либо закон уменьшения расходов, либо определить его в период проведения опробования.

В случаях, когда производится откачка через трубы из-под пакерной зоны для определения основных гидрогеологических параметров, можно применять методику, изложенную применительно к опережающему опробованию. Однако, учитывая, что снаряды с резиновыми пакерующими элементами применяются в скважинах более глубоких, необходимо учитывать гидравлические потери в буровых трубах.

Естественно, что интерпретация данных опробования испытателем пластов на трубах затруднена неравномерностью притока жидкости в трубы. Однако в существующих для обработки методах применяются стандартные приемы графоаналитической обработки опытных данных с использованием модифицированных значений времени T^* и расхода q^* . Зависимость понижения давления s во времени представляется формулой (2.49) (см. гл. II)

$$s = \frac{q^*}{2\pi km} \left[\ln \frac{T^* + t}{t} \right], \quad (2.1)$$

где

$$T^* = 2 \left[T - \frac{\int_0^T q(\tau) \tau d\tau}{V} \right], \quad (2.2)$$

$$q^* = \frac{V}{T^*};$$

V — объем жидкости, полученный за время T до остановки скважины.

При наличии кривой дебита как функции времени для определения модифицированного времени можно использовать формулу

$$T^* = 2 \left[T - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{V} \sum \frac{q_{T_i} + q_{T_i+1}}{2} (T_i + T_{i+1}) \right]. \quad (2.3)$$

При этом кривая $q(T)$ делится на равные отрезки времени продолжительностью ΔT .

При опробовании с помощью испытателей пластов обычно де-

бит как функция времени неизвестен, но имеются данные об изменении давления во времени. В этом случае получим

$$T^* = 2 \left\{ T - \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=0}^{n-1} [(P_{t_{i+1}} - P_i)(t_{i+1} + t_i)]}{\sum_{i=0}^{n-1} (P_{t_{i+1}} - P_i)} \right\}. \quad (2.4)$$

Указанная формула справедлива для диаграмм изменения давления под пакером в процессе притока в испытатель пластов с учетом первоначального периода притока и конечной кривой восстановления давления, а также второго периода притока и конечной кривой восстановления давления.

При обработке опытных данных по рассматриваемой методике необходимо проверить выполнение следующего условия:

$$1 > \frac{t}{T^* + t} \geq 0. \quad (2.5)$$

Более простые зависимости могут быть получены на основе двух- и трехступенчатой аппроксимации кривой дебита [57].

При обработке кривых притока по рассматриваемой методике дебит q обычно определяется по формуле

$$q = \frac{\Delta P^* \cdot F}{\Delta t \gamma}, \quad (2.6)$$

где F — площадь сечения внутренней полости труб под испытателем;

γ — средний удельный вес жидкости, поступающей в трубы;

ΔP^* — разность давлений между точками с интервалом времени Δt на диаграмме манометра в трубах над испытателем пластов.

При использовании этой формулы предполагается, что разница давления в соседних точках ΔP^* отражает только разность гидростатических давлений, а потери давления на трение в этих точках равны нулю.

В действительности же скорость движения жидкости в процессе работы испытателей пластов изменяется и, следовательно, меняются и потери давления, фиксируемые манометром. В результате при обработке опытных данных наблюдается разброс точек, что осложняет их интерпретацию и обуславливает погрешности в определении параметров пластов.

Наиболее заметно это проявляется при опробовании высокодебитных скважин с использованием труб небольшого диаметра. П. С. Лапшиным и Л. К. Шаромовой [33] предложено учитывать гидравлические сопротивления в трубах при обработке данных опробования, что достигается путем нахождения текущего дебита из уравнения

$$\frac{\lambda}{bc} q_n^3 + \left(\frac{\lambda P_0}{c} + \frac{\lambda}{cb} \sum_{i=1}^{n-1} q_i \right) q_n^2 + \frac{1}{b} q_n + \frac{1}{b} \sum_{i=1}^{n-1} q_i - P_n^* + P_0 + P_n''' = 0, \quad (2.7)$$

где

$$b = \frac{F \cdot 1000}{\gamma \Delta t}; \quad c = 2F^2 q d; \quad P_0 = \frac{H_0 \gamma}{1000},$$

где P_0 — давление жидкости, залитой в трубы перед испытанием, в кгс/см²;

P_n и P_n'' — давление, записанное манометром, установленным в трубы под КИИ и на устье скважины, в кгс/см²;

λ — коэффициент гидравлического сопротивления труб;

q_n — дебит, соответствующий точке n ;

q_t — мгновенный дебит;

Δt — интервал времени между двумя замерами в сек;

q — ускорение силы тяжести;

d — внутренний диаметр труб, в см;

H_0 — первоначальный уровень жидкости над КИИ в см.

В УфНИИ составлена инструкция расчетов по предлагаемой методике с использованием ЭВМ «Наирн».

Применение опробователей пластов также позволяет приблизительно оценить параметры пластов. Поскольку при использовании таких опробователей приток в баллон происходит только в одном перфорационном отверстии, течение жидкости вблизи этого отверстия оказывается весьма близким радиально-сферическому, а изменение давления во времени может быть выражено формулой [13]

$$P(t) = P_n - \frac{\mu}{4\pi k} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V}{T} \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta t}} - \frac{1}{\sqrt{T + \Delta t}} \right), \quad (2.8)$$

где P_n — начальное пластовое давление, $a = \frac{\mu c \Phi}{k}$ (c — коэффициент сжимаемости, Φ — коэффициент пористости);

V — общий объем добытой жидкости;

T — общий период пребывания опробователя открытым (продолжительность периода снижения давления);

Δt — время после закрытия опробователя (время восстановления давления).

Практически во всех случаях обработка кривых восстановления давления может производиться в зависимости от функции времени $\left(\frac{1}{\sqrt{\Delta t}} - \frac{1}{\sqrt{T + \Delta t}} \right)$.

Применение опробователей на кабеле позволяет получить данные о зональном значении коэффициента фильтрации пластов путем их точечного зондирования.

§ 3. РАСХОДОМЕТРИЯ СКВАЖИН

Метод расходометрии основан на определении профиля расхода потока по стволу скважины при наливе или откачке с помощью расходомера. Гидрогеологическое обоснование метода рассмотрим на примере налива в гидродинамически совершенную скважину,

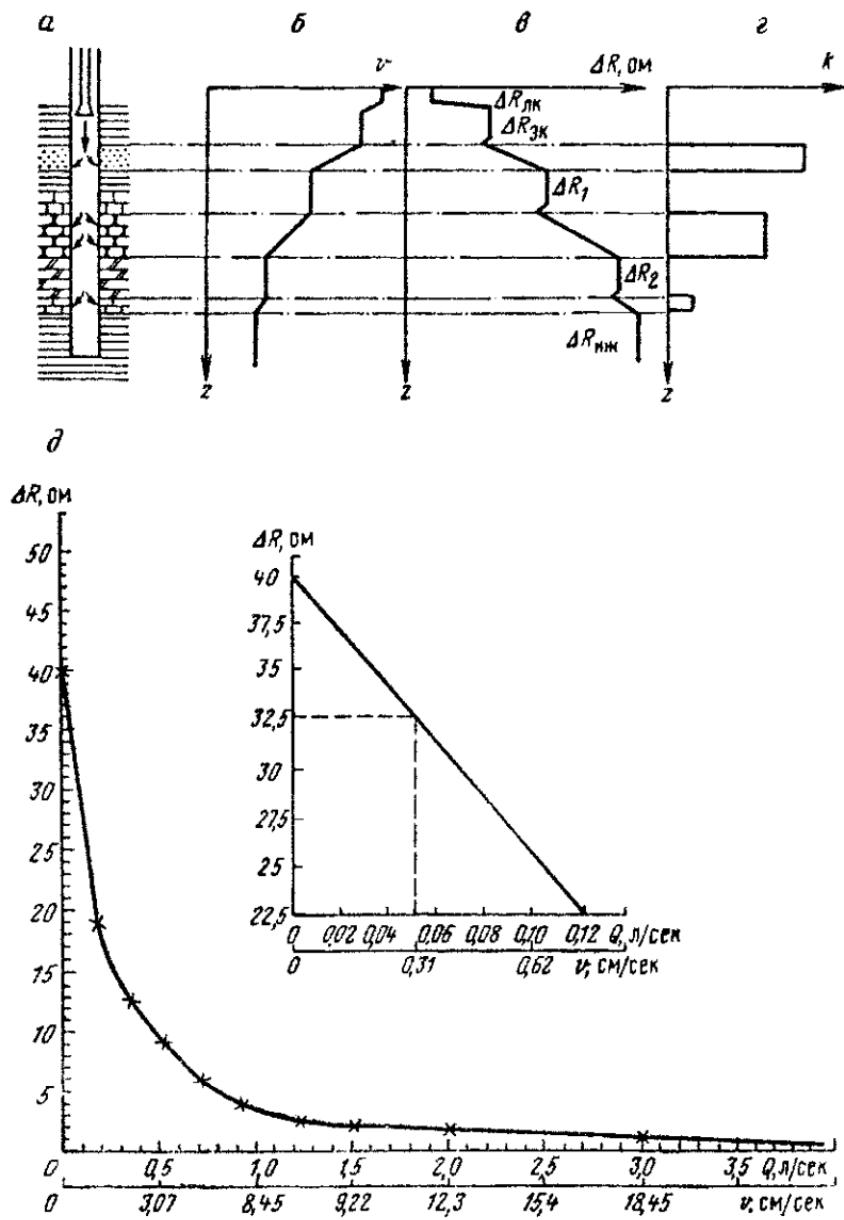


Рис. 59. Схема послойного определения водопроводимости пород расходомером при наливах.

a — разрез скважины; *б* — график вертикальной скорости; *в* — график показаний термодебитомера; *г* — профиль водопроводимости; *д* — эталонные графики термодебитомера СГД-2 (диаметр эталонировочной трубы — 124 мм, $R_{18^\circ} = 1000 \text{ см}$)

вскрывшую три напорных горизонта с различными пьезометрическими уровнями (рис. 59, а). Уровень воды в скважине к моменту проведения налива соответствует режиму равновесия пьезометрических напоров горизонтов. При этом обычно имеют место два расчетных случая.

В первом случае напоры водоносных пластов близки или опробуются единый комплекс, в котором предполагается наличие нескольких пластов с различной проницаемостью. Тогда при относительно длительном наливе и небольшом его дебите можно считать, что процесс фильтрации является квазистационарным и дебиты поглощения Q_i связаны с соответствующими повышениями уровня s_i линейной зависимостью типа (2.9) гл. II:

$$\Delta Q_i = \xi T_i s_i, \quad (3.1)$$

где $T_i = k_i m_i$ — проводимость i -го слоя с коэффициентом фильтрации k_i и мощностью m_i .

Считая величину ξ одинаковой по всей высоте скважины и зная поинтервальные расходы поглощения ΔQ_i , в соответствии с (3.1) можно определить проводимость T_i из соотношения

$$T_i = \frac{\Delta Q_i}{Q} T, \quad (3.2)$$

где Q — суммарный расход скважины; T — суммарная проводимость пласта, методика определения которой излагается в гл. II (в частности, для слоистых пластов в § 3).

Определенная расходомером скорость движения жидкости по стволу скважины $v = f(z)$ пересчитывается затем на объемный расход по соотношению

$$Q'_i = v_i \pi r^2, \quad (3.3)$$

где r — радиус канала расходомера при пакерной системе или радиус скважины для беспакерного прибора (в этом случае необходимо введение поправочного коэффициента, учитывающего диаметр скважины).

Далее по известным расходам Q_i в интервалах их постоянных значений (см. рис. 59, а) определяются частные расходы поглощения ΔQ_i каждого проницаемого пласта:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_3 &= Q'_3; \\ \Delta Q_2 &= Q'_2 - Q'_3; \\ \Delta Q'_3 &= Q'_1 - Q'_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

При оценке водопроводимости пластов для рассматриваемого случая большое значение приобретают особенности движения воды внутри фильтра и проявляющиеся в закономерном увеличении входных скоростей по длине фильтра в направлении положения всасывающей системы насосов. Это обстоятельство наглядно иллюстрируется кривыми расходометрии опытной скважины на рис. 60,

в которой откачка поочередно производилась при положении сме-
сителя эрлифта над фильтром и в специальной водоподъемной
трубе диаметром 100 мм, опущенной в скважину большого диаметра
и вваренной в отстойник. Очевидно, что при разном положении
всаса кривые расходометрии свидетельствуют о закономерном уве-
личении приращений расходов по мере приближения к нему. Без
учета особенностей движения воды внутри фильтра интерпретация
кривых расходометрии для оценки проницаемости пласта может
привести к ошибочным результатам.

Теоретически и экспериментально получено [25, 72], что при
движении воды внутри фильтра с присоединением ее масс по его дли-
не вследствие неравномерных гид-
равлических потерь эпюра входных
скоростей вполне удовлетворительно
описывается зависимостью

$$v_{bx} = v_0 \operatorname{ch} \frac{\mu \eta}{D} z, \quad (3.5)$$

где v_{bx} — входная скорость воды в
любом сечении z по высоте фильтра,
м/сек; v_0 — входная скорость воды
в начальном сечении фильтра при
 $z=0$ м/сек; μ — коэффициент рас-
хода; η — скважность фильтра; D —
диаметр фильтра (скважины), см.

Входная скорость, служащая критерием для определения по-
ложения слоев с различной проницаемостью и их количественного
сопоставления, зависит от отношения описываемого участка дли-
ны фильтра к его диаметру и параметра $\varepsilon = \mu \eta$, характеризующе-
го гидравлические свойства фильтра.

Согласно лабораторным исследованиям Петерсена, Альбертсона
и Ровера [72] с учетом контактных потерь напора в зоне фильтр —
гравийная обсыпка величина ε может быть определена с исполь-
зованием данных табл. 30. Близкие к этим значениям ε были
получены ВНИИ Водгео при исследованиях фильтров на Горьков-
ском опытном участке [3].

При оценке ε величина скважности принимается в долях еди-
ницы. Для определения проницаемости пород по данным расхodo-
метрии можно предложить такую последовательность расчетов.

1. На основе опытной кривой расходометрии производится по-
строение дифференциальной кривой изменения входных скоростей
или приращения расходов по высоте фильтра (необсаженной части
водоносных пород).

2. Анализируется вид кривой и на ней выделяются точки пере-
гиба, свидетельствующие о смене водопроницаемости пород в раз-
резе. По положению точки перегиба, которое может быть установ-
лено

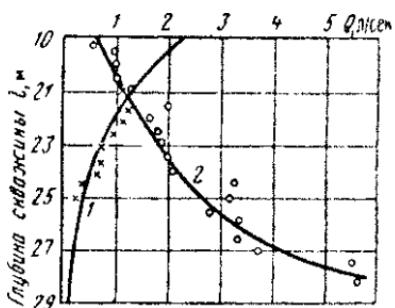


Рис. 60. Графики расходометрии скважины при различном направ-
лении движения жидкости
1 — при откачке из скважины; 2 — при
откачке из трубы, вмонтированной
в низ отстойника

лено путем построения графиков зависимости $\lg v$ от z/D , определяется мощность слоев с различной проницаемостью.

Таблица 30

Значение коэффициента расхода фильтров в зависимости от состава контактирующих с ними обсыпок

Тип фильтра	Скважинность фильтра, %	Значение ϵ								
		при величине среднего диаметра гравия d_{40} , мм								
		20	16	12	10	8	6	4	2	1,4
Штампованный со щелями типа моста	3,5	0,82	0,81	0,78	0,75	0,69	0,60	0,48	0,32	0,26
	7,2	0,64	0,62	0,57	0,53	0,48	0,40	0,30	—	—
	11,2	0,56	0,52	0,46	0,41	0,36	0,30	—	—	—
Проволочный	14,6	0,53	0,48	0,42	0,37	0,32	0,27	—	—	—
	18,2	0,51	0,51	0,51	0,50	0,48	0,46	0,41	0,34	0,32
	30,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32	0,30	0,27	0,23	0,19
Щелевой с выступающими кромками	4,8	0,88	0,84	0,79	0,75	0,68	0,57	—	—	—
Дырчатый с сеткой на поверхности	14,8	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,62	0,48	0,40

3. В пределах каждого прослоя при закономерном росте входных скоростей по высоте фильтра производится построение теоретической кривой с использованием формулы (3.5) и ее параметров v_0 и ϵ . При этом v_0 берется путем экстраполяции опытной кривой до точки $z = 0$ (начальное сечение фильтра), а ϵ принимается согласно табл. 30. При совпадении теоретической кривой с экспериментальной делается вывод об однородности изучаемого слоя по вертикали.

Отклонение теоретической кривой от опытной свидетельствует о наличии более слабопроницаемых и высокопроницаемых разностей в верхней части разреза.

При расхождениях опытной и теоретической кривых производится построение эпюр отношения скоростей, причем в каждой точке берется отношение $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}}$. Тогда непосредственно получаем соотношение проницаемости водоносных горизонтов, встреченных в разрезе с учетом неравномерности нагрузки фильтров скважин.

Пример расчета. Опытная скважина вскрывает водоносный пласт, приуроченный к пескам I надпойменной террасы р. Волги. В разрезе выделяется слой мелкозернистых песков, который сменяется в нижней его части средне- и крупнозернистыми песками. Скважина оборудована фильтром с водоприемной поверхностью из винилластовой сетки с размером отверстий 2,8 мм в два слоя на трубчатом каркасе с круглой перфорацией. Величина ϵ для сетчатых фильтров в крупнозернистых песках колеблется в пределах $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$. При скважинности каркаса $\eta \approx 0,18$ и принимаемом максимальном значении $\mu \approx 5 \cdot 10^{-2}$ получено $\epsilon = 0,9 \cdot 10^{-2}$. Кривая расходометрии скважины приведена на рис. 61. Дифференциальная кривая расходометрии с интервалом 0,5 м позволила определить входные скорости в фильтр скважины. Далее при известном значении параметра ϵ и заданной конструкции скважины производится расчет теоретической

скорости входа воды в фильтр, которая имела бы место при однородном строении водоносного горизонта ($v_{\text{теор}}$) и вычисляется отношение $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}}$. На рис. 61 представлен график изменения $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}}$ по вертикали. Сравнение отношений

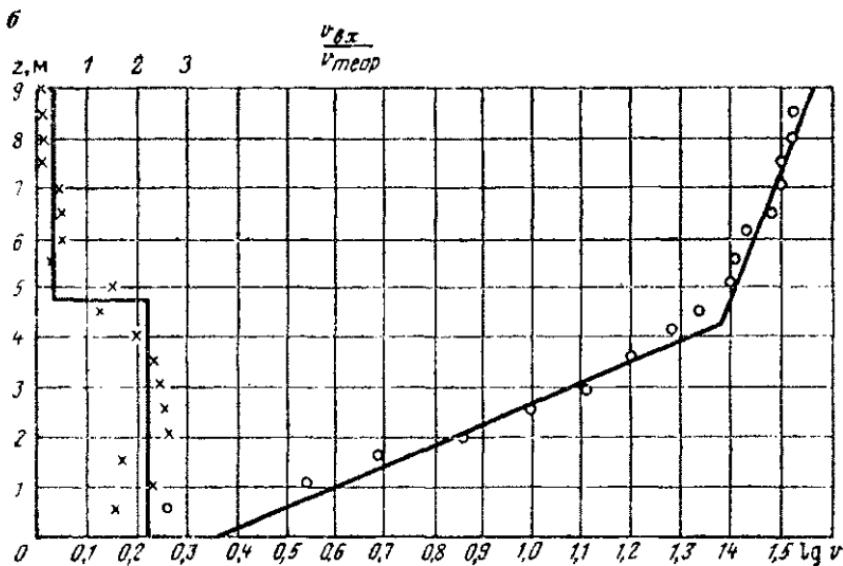
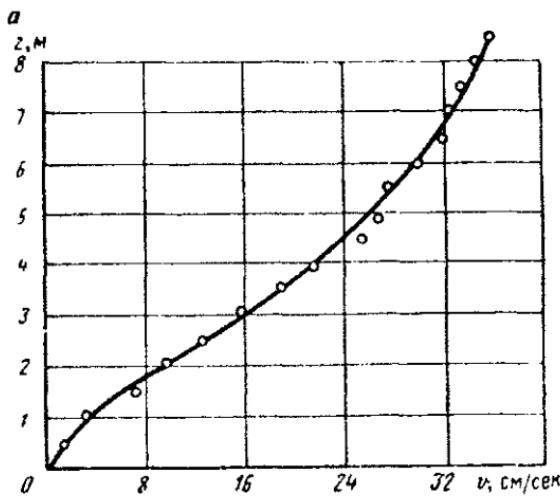


Рис. 61. Пример интерпретации данных расходометрии.
а — кривая расходометрии; *б* — график изменения $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}}$ по вертикали

$v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}}$ для верхней и нижней частей обводненных пород позволяет в первом приближении оценить соотношения их проницаемостей. Поскольку в указанных отношениях учтена неравномерность нагрузки фильтров скважин, связанная с их конструктивными особенностями, прямое их сопоставление позволяет определить,

во сколько раз отличается проницаемость каждого слоя. В рассматриваемом случае для нижнего пласта $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}} = 2,28$, а для верхнего слоя $v_{\text{вх}}/v_{\text{теор}} = 0,31$. В соответствии с этим проницаемость нижнего слоя в 7,4 раза более проницаемости верхнего пропластика.

На этом же участке проводилось определение параметров водоносных пород по данным кустовых откачек. Водопроводимость пласта колебалась в пределах 420—440 м²/сутки. Коэффициент фильтрации верхнего слоя рассчитывался по данным наблюдений за скоростью снижения уровня в нем при откачке из более проницаемого нижнего слоя (по В. М. Григорьеву). Он оказался равным 5,5 м/сутки. Проницаемость верхнего слоя в соответствии с этим определилась в 40 м²/сутки (мощность прослоя 7,5 м). Проводимость нижнего слоя составила 380—400 м²/сутки, при этом она соответствовала коэффициенту фильтрации 38—40 м/сутки. Следовательно, отношения проницаемости нижнего и верхнего слоев составляют 6,9—7,3, т. е. соотношения коэффициентов фильтрации горизонтов близки к результатам, полученным методом расходометрии.

Во втором случае, т. е. при существенно отличных пьезометрических напорах водоносных горизонтов, вскрываемых скважиной, наиболее целесообразно производить оценку параметров водоносных пород по данным о величине перетока, фиксируемого расходометром, и известной разности статических уровней в отдельных водоносных пластиах. При этом (для двух водоносных горизонтов) водопроводимость горизонтов определяется соотношением

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{Q}{\epsilon(H_1 - H)}; \\ T_2 &= \frac{Q}{\epsilon(H - H_2)}, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где Q — расход перетока, фиксируемый в невозбужденной скважине из пласта с большим напором H_1 .

При проведении расходометрии в скважинах рекомендуется учитывать следующие технологические требования. Во-первых, исследуемая скважина должна быть подготовлена таким образом, чтобы обеспечивались правильные интервалы посадки фильтров (или устойчивость открытого ствола), свободное сообщение водоносных пластов со скважиной, очистка стенок от шлама и глинистого раствора, т. е. уменьшение гидравлического сопротивления фильтровой (или прискважинной) зоны; в ряде случаев необходимо предварительное оттартирование или промывка и т. п.

Перед началом налива (или откачки) уровень воды в скважине должен стабилизироваться. Налив в скважину производится с помощью установки, обеспечивающей постоянный расход с обязательной его регистрацией. Измерения расходометром необходимо начинать только после стабилизации динамического уровня в скважине и проводить их при постоянных значениях Q и s .

Перед проведением измерений расходометр должен быть протарирован в условиях, аналогичных условиям измерений (или близких к ним), например, по диаметру скважины и фильтров, а для термоэлектрических дебитометров и по теплофизическим свойствам нагнетаемой жидкости.

При проведении измерений предпочтительнее использовать скважинные расходомеры с пакерной системой, обеспечивающей движение жидкости по каналу расходомера, и обязательно центрировать скважинный прибор при помощи направляющих фонарей, что уменьшает ошибки измерений.

Для проведения количественной интерпретации данных расходометрии большое значение имеет способ регистрации расходов по скважине, что связано с необходимостью использовать возможно меньшие дебиты скважины, и соответственно применять приборы с высокой чувствительностью и точностью.

Применяемые в настоящее время скважинные расходомеры с датчиками турбинного (крыльчатки) и поплавково-пружинного типа [44] обладают рядом недостатков, основными из которых являются низкая чувствительность (приводимые в некоторых последних работах, например [19], [29], данные о высокой чувствительности турбинных расходомеров характерны для лабораторных условий), высокая инерционность, сравнительно низкая надежность для скважинных условий (например, возможность засорения чувствительных элементов частицами шлама). От этих недостатков в значительной мере свободны расходомеры — термоанемометры, основанные на зависимости теплоотдачи помещенной в поток проволоки, нагретой электрическим током, от скорости потока жидкости.

Величина изменения сопротивления датчика ΔR , определяемая теплоотдачей, в общем случае зависит от целого ряда теплофизических и геометрических факторов, однако при помощи определенных методических приемов [61] можно добиться такого положения, что величина ΔR будет определяться скоростью потока, т. е. получит зависимость $\Delta R = f(v)$, типичный вид которой представлен на рис. 59, д.

Учитывая, что методика и техника работ с расходомерами турбинного типа изложена достаточно полно в ряде работ, например, [18] и др., рассмотрим на конкретных примерах методику и технику исследований с термодебитометром, принимая во внимание его перспективность при исследованиях гидрогеологических скважин.

Схематическая дебитограмма, зарегистрированная термоанемометром, представлена на рис. 59, где значениями $\Delta R_{лк}$, $\Delta R_{эк}$ и $\Delta R_{нж}$ показаны соответственно изменения сопротивления датчика в лифтовой колонке, эксплуатационной колонне и неподвижной жидкости, а ΔR_1 и ΔR_2 — в интервалах между поглощающими пластами. Эталонная кривая (рис. 59, д) позволяет по величине ΔR найти скорость потока (или его расход) и, следовательно, рассчитать дебиты поглощения Q_t .

Высокая чувствительность и низкая инерционность термоанемометра позволяет проводить измерения не только по методике дискретных замеров, общепринятых при расходометрии, но и непрерывно по стволу скважины (при скорости перемещения прибора 60—80 м/ч).

Последовательность проведения измерений на скважине с термодебитометром (типа СТД-2, разработанным в ВУФ ВНИИГеофизика) по методике дискретных замеров заключается в следующем.

После остановки прибора в исследуемой точке производится определение показания нуль-прибора, принимаемое за начало отсчета при измерениях (этим исключается влияние скважинных потенциалов).

Далее в режиме «термометр» подается малый ток питания ($I = 10-12$ мА) и измеряется сопротивление датчика, соответствующее температуре в данной точке, а затем измерительный мост балансируется по нуль-прибору с помощью балансового сопротивления.

После этого датчик переводится в режим «дебитомера», при котором подается ток в 120 мА и за доли секунд происходит перегрев датчика, вызывающий разбаланс моста. Величина разбаланса, компенсируемая по нуль-прибору, дает отсчет ΔR . После определения величины ΔR ток выключается и прибор переводится на следующую точку измерений.

На рис. 62, а представлены результаты расходометрии по методике дискретных замеров с термодебитометром СТД-2 по одной из скважин п-ова Мангышлак в открытом стволе скважины, вскрывшей трещиноватые известняки и мергели мелового и палеогенового возраста. Результаты обработки материалов и расчетов по соотношению (3.2) свидетельствуют о сравнительной фильтрационной однородности проницаемых зон (измерения проводились при самоизливе с суммарным дебитом, равным 0,13 л/сек).

Методика непрерывных замеров заключается в последовательной регистрации термодебитограммы (при скорости 60—80 м/ч) и термограммы (запись ΔR в режиме «термометра» при скорости 600—800 м/ч). При этом по термограмме учитывается влияние изменения величины ΔR (в режиме «дебитомера») за счет изменения температуры жидкости по скважине.

Следует отметить, что методику непрерывных замеров рекомендуется применять для дополнения дискретных замеров в целях увеличения детальности исследований или для предварительного изучения фильтрационной неоднородности.

Пример термодебитограммы, зарегистрированной по методике непрерывных замеров, представлен на рис. 62, б.

Исследование проводилось в скважинах Западной Сибири, расположенных на расстоянии около 20 км друг от друга, вскрывших одновозрастные юрские песчано-глинистые отложения. Однако по фильтрационной однородности разрезы скважин значительно различаются: так, по скв. 12 величины коэффициентов фильтрации отдельных пластов отличаются в 37 раз при резкой невыдержанности по мощности и пористости, а по скв. 63 коэффициенты фильтрации отличаются менее чем в 7 раз при сравнительной однородности по мощности и пористости. Подобные результаты каче-

ственно согласуются с диаграммами стандартного каротажа (КС и ПС) [27], что подтверждает необходимость проведения каротажа в качестве обязательного этапа опытно-фильтрационных работ.

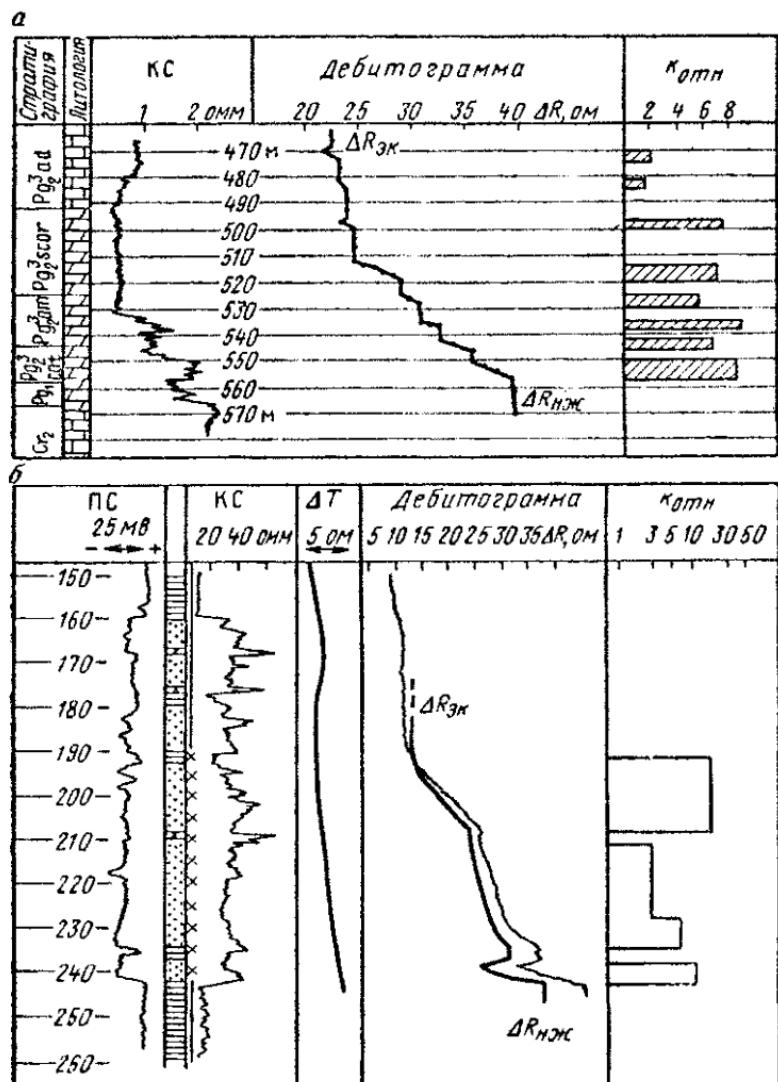


Рис. 62. Расходометрия с использованием термодебитомера.
 а — по методике дискретных замеров; б — по методике непрерывных измерений

При интерпретации результатов расходометрии, представленных на рис. 62, использовалось упрощенное соотношение (3.2), не учитывающее гидравлики потока в интервале фильтров.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИГРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

а. Основные теоретические положения миграции подземных вод

Под миграцией подземных вод понимаются процессы переноса (перемещения) отдельных физико-химических компонентов подземных вод в порах и трещинах горных пород (тепло- и массопереноса), рассматриваемые с точки зрения изменения состава подземных вод [65].

Основное значение в процессах миграции подземных вод обычно имеет конвективный перенос вещества с фильтрационным потоком, важнейшей характеристикой которого является действительная скорость фильтрации u , представляющая собой отношение расхода фильтрационного потока к площади активных в фильтрационном отношении пор. Следовательно,

$$u = \frac{v}{n}; \quad n = n_0 - n_{\text{св}} - n_{\text{зв}}, \quad (4.1)$$

где v — скорость фильтрации; n_0 и n — полная и активная пористость фильтрующей породы; $n_{\text{св}}$ и $n_{\text{зв}}$ — объемное содержание связной воды и защемленного воздуха.

На процессы переноса солей существенное влияние может оказывать сорбция солей на горных породах и растворение (выщелачивание) отдельных компонентов горных пород. Эти процессы замедляют конвективный перенос солей, скорость которого u_a в этом случае определяется формулой типа (4.1) с заменой активной пористости на эффективную:

$$u_a = \frac{v}{n_a}; \quad (4.2)$$

$$n_a = n + \frac{1}{\beta}, \quad (4.3)$$

где β — коэффициент распределения, зависящий от физико-химических условий взаимодействия воды и породы [12].

Скорость конвективного теплопереноса также замедляется по сравнению с действительной скоростью фильтрации за счет теплового взаимодействия воды и породы, причем для нее справедлива формула (4.2), в которой только величина n_a представляет собой тепловую поровую емкость породы, определяемую выражением

$$n_a = n_b = n + (1 - n) \frac{\bar{c}_p \delta_p}{\bar{c}_w \gamma}, \quad (4.4)$$

где \bar{c}_p и \bar{c}_w — удельные теплоемкости породы и воды; δ_p и γ — удельные веса скелета породы и воды [12, 60].

Расчетная схема миграции подземных вод, в которой учитывается только конвективный перенос с фильтрационным потоком,

называется схемой «поршневого вытеснения». При ее использовании достаточно в каждой точке пласта знать выражение для скорости фильтрации. Осложнения в расчетах по схеме «поршневого вытеснения» нередко связаны с необходимостью учета слоистости водоносного пласта. При сравнительно небольшом различии в проницаемости отдельных слоев можно считать, что в пласте сохраняется плановый характер потока, так что для любого сечения скорости фильтрации в каждом слое будут изменяться пропорционально его коэффициенту фильтрации.

Аналогичность структуры выражений скоростей v и v_c позволяет унифицировать в дальнейшем расчетные зависимости конвективного переноса (по схеме поршневого вытеснения), записывая их без учета взаимодействия воды и породы; при необходимости же его учета в процессах солепереноса следует только заменить активную пористость n на ее эффективное значение n_3 , определяемое формулой (4.3) для переноса солей и формулой (4.4) для теплопереноса.

При использовании в качестве расчетной схемы поршневого вытеснения основным миграционным параметром является коэффициент скорости миграции $\kappa = \frac{k}{n}$, который представляет собой скорость конвективного переноса при единичном градиенте фильтрации. Величины κ в общем случае слоистого строения пласта должны определяться для каждого слоя в отдельности.

Для солевого индикатора представляет интерес непосредственное определение величины эффективной пористости, которое можно осуществить, имея данные прослойного определения проницаемости, получаемые откачками, резистивиметрией, расходометрией и т. п. При использовании несорбируемого индикатора κ представляет собой коэффициент действительной скорости фильтрации $\frac{k}{n}$; для песчаных пород величина активной пористости n может задаваться по лабораторным данным и тогда по значениям κ можно определить соответствующие значения коэффициента фильтрации. Такой же путь расчета может осуществляться и при запуске теплового индикатора в песчаные породы, поскольку величина n , в этом случае изменяется незначительно и ее определение также допустимо проводить по литературным данным [30].

Процессы диффузионного переноса солей характеризуются коэффициентом молекулярной диффузии D_m , который представляет собой расход вещества, переносимого диффузионным путем при единичном градиенте концентрации и отнесенного к площади сечения потока*, его характерные значения для песчаных пород $D_m \approx 10^{-4}$ м²/сутки, а для суглинистых $D_m \approx 10^{-5}$ м²/сутки [12, 63].

Кондуктивный перенос тепла характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , представляющим собой отношение расхода

* В некоторых работах коэффициент диффузии определяется отношением расхода диффузионного потока, отнесенного к площади сечения пор.

теплового потока, переносимого за счет теплопроводности, к градиенту температуры и площади поперечного сечения потока [12, 60].

Внутрипоровое рассеивание вещества (микродисперсия) в фильтрационном потоке интенсируется, кроме того, гидродисперсией, вызываемой неравномерностью распределения локальных скоростей движения воды в поровом пространстве [12, 65].

При исследованиях миграции в сравнительно хорошо проницаемых водоносных пластах микродисперсия обычно оказывается пренебрежимо малой. Наблюдаемое же в этих условиях рассеивание солей и тепла обусловливается процессами миграции, возникающими за счет влияния неоднородности строения водоносных пластов в его поперечном сечении [12, 51, 63].

По геолого-гидрогеологическим признакам можно выделить два основных типа такой неоднородности пласта: 1) слоистый пласт, который характеризуется чередованием проницаемых (песчаных) слоев, миграция потока в этом случае прежде всего происходит по более проницаемым слоям путем конвективного переноса, распространяясь в слабопроницаемые слои посредством поперечной диффузии [12, 34, 51, 63]; 2) трещинно-пористый пласт (см. рис. 19), для которого характерно наличие системы разветвленных трещин, разбивающих горную породу на пористые блоки той или иной конфигурации; определяющими миграционными процессами здесь являются конвективный перенос по системе трещин и поперечная диффузия внутрь пористых блоков [12, 47].

При количественном анализе рассеивания солей и тепла в фильтрационном потоке целесообразно рассматривать две расчетные схемы: гетерогенную и макродисперсию, теоретические основы которых описаны в работах [12, 49, 51].

Гетерогенная схема применима при условии, что в рассматриваемое время диффузионное проникновение вещества (или тепла) не достигает середины слабопроницаемых включений (слоев, блоков). При реальных сроках проведения опытных работ эта схема может использоваться при размерах слабопроницаемых включений $0,2 \div 0,5$ м.

При расчетах миграции по гетерогенной схеме величина коэффициента скорости миграции характеризует проницаемость и пористость проницаемых (проводящих) слоев (включений), относительное содержание которых

$$\bar{m} = \frac{1}{m_{\text{сум}}} \sum_{i=1}^k m_i,$$

где m_i — мощности проницаемых слоев; $m_{\text{сум}}$ — мощность пласта является дополнительным параметром системы. Кроме того, параметром этой схемы является эффективная пористость слабопроницаемых слоев (блоков) n' (n'_s).

Схема макродисперсии имеет место при условии, что молекулярно-диффузионным потоком охватывается весь объем сла-

бопроницаемых включений. Эта схема характерна для неупорядоченной неоднородности строения пласта при размерах отдельных включений, измеряемых сантиметрами и первыми десятками сантиметров. В этом случае распределение вещества описывается диффузионным уравнением с расчетным коэффициентом диффузии (макродисперсии) D , определяемым выражением [65]

$$D = \delta_2 v^2, \quad (4.5)$$

где δ_2 — параметр макродисперсии, для которого справедлива следующая оценочная формула

$$\delta_2 = \frac{m' (m' + m)}{8D_m}, \quad (4.6)$$

где m' и m — характерные размеры слабопроницаемых и проницаемых слоев.

К настоящему времени существуют лишь единичные определения параметра макродисперсии. По данным двух полевых определений (для водоносного горизонта, представленного трещиноватыми опоками, и для песчаного водоносного горизонта прибрежно-морского генезиса) величина параметра макродисперсии составила $\delta_2 = 100 \div 150$ суток.

При использовании схемы макродисперсии определяется параметр макродисперсии δ_2 , связанный с размерами макровключений (слоев) формулой (4.6), и расчетная пористость пласта n^* , которая соответствует ее средневзвешенному значению из пористостей проницаемых и слабопроницаемых включений [49, 51].

6. Основные способы индикаторного опробования пластов

При опробовании водоносного пласта в первую очередь выделяются проницаемые слои (или серии проницаемых слоев) однородные в фильтрационном отношении. Для этого используются данные расходометрии, поинтервального опробования, геофизических исследований (электрокаротаж, нейтрон-нейтронный каротаж и др.) и лабораторного изучения проницаемости и пористости керна. Полученные сведения кладутся в основу построения схематизации пласта.

На основании построенной схемы пласта разрабатываются способы опробования. При существенной неоднородности разреза, когда в нем могут быть выделены несколько квазиоднородных (гетерогенно-однородных) слоев, опробование должно проводиться поинтервально (раздельно на каждый гетерогенно-однородный слой), либо возможно суммарное опробование с автоматическим контролем раздельно для каждого выделенного интервала (рис. 63).

В дальнейшем методы проведения экспериментов и обработки их данных излагаются применительно к поинтервальному опробованию водоносного пласта, который в пределах интервала опробования считается однородным по сечению. Однако эти методы

можно распространить на случай пласта слоистого строения (т. е. состоящего из серии квазинеоднородных слоев) при суммарном опробовании с поинтервальным контролем в пределах каждого слоя, считая, что расход потока распределяется между несколькими квазинеоднородными слоями пропорционально их проводимостям, т. е. для i -го слоя с проводимостью $k_i m_i$ расход потока Q_i будет равен

$$Q_i = \frac{k_i m_i}{T} Q. \quad (4.7)$$

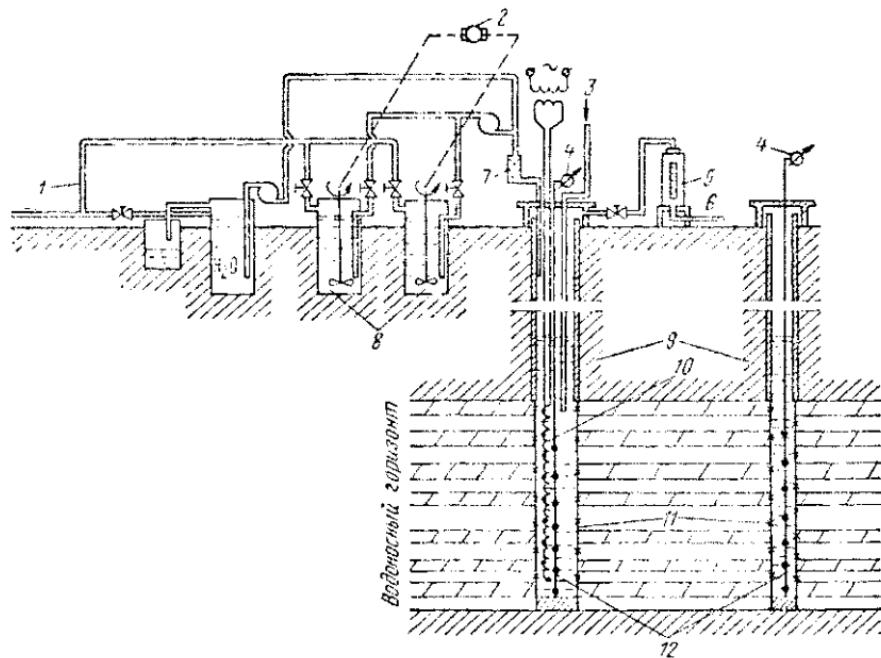


Рис. 63. Схема опытной установки для определения миграционных параметров пласта

1 — магистральный водопровод; 2 — электропровод; 3 — сжатый воздух; 4 — регистратор концентрации и температуры; 5 — расходомер; 6 — слив; 7 — смеситель; 8 — индикаторный раствор; 9 — цементаж; 10 — тепло-электроагреватель; 11 — фильтр; 12 — датчики концентрации и температуры

Таким образом, в случае поинтервального контроля во всех расчетных формулах в качестве расхода подставляется его значение для i -го слоя, определяемое выражением (4.7). При этом для схемы макродисперсии под m_i понимается мощность i -го интервала l , а для гетерогенной схемы $m_i = ml$. Кроме того, во всех расчетных формулах вместо эффективной пористости подставляется коэффициент скорости миграции.

Для определения миграционных параметров рассматривается использование двух способов индикаторного опробования [50, 52, 54, 62]: кустового налива и односкважинного налива-откачки.

Кустовой налив в нагнетательную скважину при наличии одной или нескольких скважин, служащих для наблюдения за про-

хождением индикаторного раствора. Этот способ опробования дает возможность наиболее детально изучить строение пласта и определить миграционные параметры. Существенным недостатком данного способа является необходимость бурения нескольких скважин на сравнительно близком расстоянии (10—20 м), что связано с трудностями, а нередко его использование для опробования глубоких водоносных горизонтов практически неприменимо. Кроме того, для проведения такого опыта требуется длительное время и большое количество индикаторного раствора, что связано с необходимостью распространения индикатора на сравнительно большие расстояния.

Разновидностью кустового налива является дуплетный способ опробования с одной нагнетательной и одной разгрузочной скважинами. Этот способ дает возможность уменьшить время опробования и количество индикаторного раствора, хотя технические трудности, связанные с бурением близкорасположенных скважин, при этом не исчезают. Ограничение его использования связано и с трудностями теоретического обоснования методики обработки такого опыта, имеющейся в настоящее время только для некоторых частных случаев [52], поэтому в дальнейшем этот способ не рассматривается.

Односкважинный налив-откачка. По этому способу в течение некоторого времени производится налив индикаторного раствора, а затем из этой же скважины производится откачка [49, 50]. Миграционные параметры пласта определяются в этом случае по кривой изменения концентрации (выходной кривой) при откачке. Этот способ технически наиболее прост и требует сравнительно меньших затрат индикаторного раствора; существенным его недостатком является меньшая информативность, поскольку на основании экспериментальных данных в этом случае нельзя независимо определить все миграционные параметры.

Во всех случаях для уменьшения затрат индикатора его запуск может проводиться индикаторной волной, или пакетом индикатора, когда подача индикатора в нагнетательную скважину производится лишь в течение некоторого времени, после чего с тем же расходом продолжается подача воды, по составу соответствующая пластовой. Разновидностью метода индикаторной волны является импульсный метод, когда в скважину загружается некоторая порция индикатора (обычно радиоактивного) и далее производится нагнетание пластовой воды. Применение этого метода весьма ограничено в силу того, что для достаточно надежной регистрации изменения концентрации индикатора необходимо создание очень высоких исходных концентраций.

Выбор индикаторов определяется рядом требований и зависит от конкретных геолого-гидрогеологических условий. Основные требования и условия применимости индикаторов излагаются в работах [52, 54, 62, 68]. Для проведения миграционных опытов используются солевые индикаторы (водные растворы различных солей);

тепловые индикаторы (горячая или холодная вода, отличная по температуре от пластовой воды); радиоактивные изотопы, которые могут применяться в условиях незначительной активности пластовых вод и горных пород, цветовые индикаторы (растворы различных красителей); нередко целесообразно применять смешанные индикаторы (например, горячий раствор электролита, содержащий радиоактивные изотопы, и т. п.).

Наблюдения за индикатором осуществляются автоматически (по данным датчиков, располагаемых в скважинах) или с отбором проб. Автоматические способы наблюдений дают возможность непрерывно фиксировать изменение концентрации индикатора в стволе или на устье скважины, что в значительной степени облегчает обработку данных опытных работ. Среди автоматических способов могут использоваться: кондуктометрия, или резистивиметрия (для солевого индикатора), термометрия, или термокаротаж (для теплового индикатора), гаммаметрия, гамма-каротаж, селективный гамма-каротаж (для радиоактивного индикатора).

При регистрации индикатора с отбором проб практически отпадает возможность использования теплового индикатора; в этом случае для определения индикаторов используются химические методы или кондуктометрия (для солевого индикатора); гаммаметрия, селективная гаммаметрия (для радиоактивных индикаторов), колориметрия (для цветных индикаторов).

Для учета влияния слоистости пластов определения индикаторов должны проводиться для каждого слоя в отдельности (в наблюдательных скважинах — по середине слоев, а в центральных — на границах слоев). После определения концентрации индикатора строится выходная кривая зависимости изменения относительной концентрации индикатора \bar{C} от времени, причем

$$\bar{C} = \frac{C - C_0}{C^{\circ} - C_0}, \quad (4.8)$$

где C и C° — текущее (наблюдаемое) и исходное значения концентрации индикатора, а C_0 — фоновая концентрация индикатора в природной воде опробуемого водоносного горизонта.

В зависимости от требований конкретных задач миграции подземных вод опытные работы должны проводиться таким образом, чтобы в условиях опыта воспроизводилась та или иная расчетная схема процесса, т. е. в процессе опыта должны быть определены именно те миграционные параметры, которые необходимы для проведения дальнейших расчетов. Это достигается путем подбора параметров опыта, в которые входят: расход налива или откачки, длительность опыта, расстояние до наблюдательных скважин, исходная концентрация индикаторных растворов при наливе; при проведении опыта по способу индикаторной волны, кроме того, должно обосновываться время запуска индикаторного раствора.

Условия применимости той или иной расчетной схемы определяются не только параметрами опыта, но и миграционными па-

метрами пласта. Поскольку последние могут быть определены только в процессе опыта, то при обосновании параметров опыта используются оценочные (вероятные) значения миграционных параметров. Для оценки параметров пласта используются данные геофизических исследований в скважинах, анализов керна и величины, характеризующие процессы миграции в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях.

Однако окончательная проверка правильности применения той или иной расчетной схемы может быть осуществлена только после обработки опытных данных и подстановки полученных значений параметров в формулы, характеризующие условия применимости данной расчетной схемы.

Вопросы обоснования перечисленных параметров опыта рассматриваются ниже применительно к конкретным способам опробования.

Расчет необходимых исходных концентраций индикатора проводится путем оценки необходимых достоверных значений относительных концентраций. Так, если необходимо регистрировать минимальную относительную концентрацию \bar{C}_{\min} с относительной погрешностью σ при относительной погрешности замера абсолютного значения концентрации δ , то исходная концентрация индикатора должна быть равна

$$C^* = \frac{\delta}{\sigma - \delta} \cdot \frac{C_0}{\bar{C}_{\min}} + C_0. \quad (4.9)$$

Для определения необходимого количества индикатора $M_{\text{ин}}$ используется формула

$$M_{\text{ин}} = (C^* - C_0) Q_{\text{ин}} t_{\text{оп}}, \quad (4.10)$$

где $Q_{\text{ин}}$ — расход индикаторного раствора при наливе; $t_{\text{оп}}$ — время опыта.

в. Методика определения миграционных параметров при кустовом опробовании

Перед обработкой опытных данных по характеру выходной кривой оценивается возможность применения той или иной расчетной схемы. Кривые, отвечающие обеим расчетным схемам, обладают своими специфическими признаками.

Для гетерогенной схемы характерна выпуклая кривая с быстрым нарастанием концентрации и резким выполаживанием (рис. 64, а, кривая а). Характерной особенностью данной кривой является то, что время, отсчитываемое от момента появления индикатора в наблюдательной скважине до момента достижения относительной концентрации, равной $\bar{C} = 0,5$, составляет не более 0,01—0,02 от общего времени процесса (до достижения относительной концентрации равной $\bar{C} = 0,95$). В начальной части такой выходной кривой может наблюдаться участок размыта, наличие которого

связано с проявлением процессов микродисперсии и молекулярной диффузии (см. рис. 64, *a*, кривая *b*).

Для схемы макродисперсии характерна вогнуто-выпуклая кривая с плавным нарастанием концентрации до момента времени t^0 , соответствующего относительной концентрации $\bar{C} = 0,5$, и постепенным выполаживанием кривой (рис. 64, *b*, кривая *a*). Здесь не наблюдается столь резкой асимметрии, как в предыдущем случае.

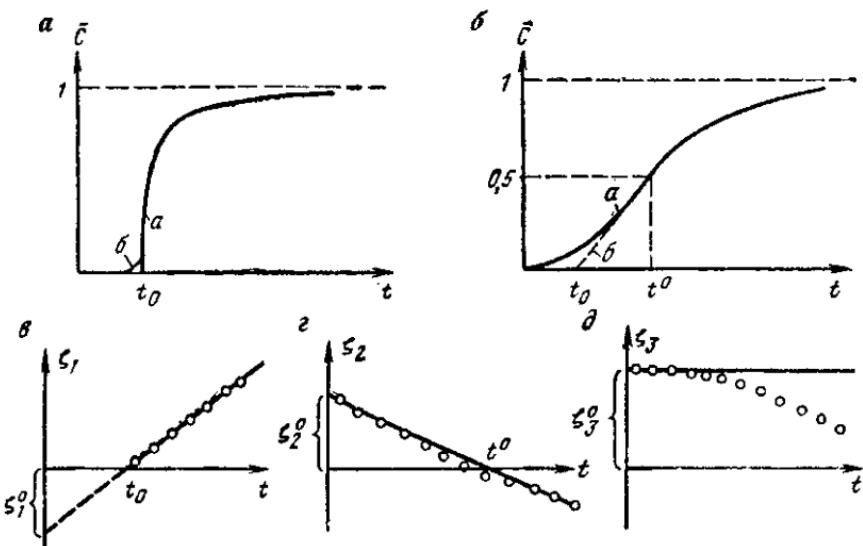


Рис. 64. Выходные кривые при непрерывном наливе индикаторного раствора.

a — гетерогенная схема; *b* — схема макродисперсии и обработка выходных кривых; *c* — для гетерогенной схемы; *d* — для схемы макродисперсии

Время t^0 достижения относительной концентрации, равной $\bar{C} = 0,5$, составляет обычно 0,1—0,5 от общего времени процесса. Начальная часть экспериментальной кривой, как и в предыдущем случае, несколько отличается от теоретической кривой (рис. 64, *b*, кривая *b*), что связано с конечными скоростями конвективного переноса в проницаемых слоях.

После анализа диагностических признаков выходной кривой проводится обработка ее в соответствии с аналитическими решениями, полученными для той или иной схемы процесса.

Для гетерогенной схемы процесса при непрерывном наливе индикаторного раствора в скважину с расходом Q_h и концентрацией C^e относительная концентрация \bar{C} , определяемая согласно (4.8), на расстоянии r от центральной скважины в момент времени t , будет равна [12, 34, 49, 51, 63]:

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}(\xi_1), \quad \xi_1 = \frac{\pi r^2}{Q_h} \sqrt{\frac{D_m n'}{t - \frac{\pi r^2 l m n}{Q_h}}}, \quad (4.11)$$

где l — мощность опробоваемого интервала; $v = \frac{l\bar{m}}{m}$ — число проницаемых слоев.

Как уже отмечалось, гетерогенная схема может применяться в тех случаях, когда в течение опыта индикатор не успевает про-диффундировать до середины слабопроницаемых слоев; причем условие применимости формулы (4.11) может быть представлено в виде

$$\eta = \frac{D_m \pi r^2 \bar{m} l}{\bar{m} m' Q_n} < 0.025. \quad (4.12)$$

Для сравнительно малых расстояний до наблюдательных скважин и сравнительно больших расходов налива это имеет место практически при любой длительности процесса.

При выполнении условия (4.12) обработку опытных данных на основании формулы (4.11) можно проводить практически по всей выходной кривой.

Если условие (4.12) не выполняется, то для обработки опытных данных может использоваться лишь часть выходной кривой до момента времени, определяемого выражением

$$t < t^* = 0.015 \frac{(m')^2 n'}{D_m} + \frac{\pi^2 l m n}{Q_n}, \quad (4.13)$$

которое справедливо при любых расстояниях до наблюдательных скважин и расходах налива. Однако для достаточно надежного определения миграционных параметров необходимо, чтобы относительная концентрация в наблюдательной скважине за время t^* успела достичь хотя бы значения $\bar{C} = 0.1 \div 0.2$. Это будет иметь место в том случае, когда безразмерный параметр η , определяемый формулой (4.12), не превышает $0.2 \div 0.3$.

При весьма больших расходах налива и малых расстояниях до наблюдательных скважин диффузия в слабопроницаемые слои может практически не проявляться, и миграция будет проходить только по проницаемым слоям в соответствии со схемой поршневого вытеснения. Поэтому для достаточно надежного определения эффективной пористости слоев необходимо, чтобы время изменения относительной концентрации в наблюдательной скважине, отсчитываемое от момента появления индикатора в наблюдательной скважине t_0 до окончания опыта, составляло бы по крайней мере $0.1 \div 0.05$ от общего времени опыта. Оценивая общее время опыта по моменту, когда относительная концентрация в наблюдательной скважине будет равна $\bar{C} = 0.95$, получим дополнительное условие применимости гетерогенной схемы в виде

$$\frac{\pi r^2 n' D_m v}{\bar{m} Q_n} > 2.5 \cdot 10^{-4} \div 1.25 \cdot 10^{-4}. \quad (4.14)$$

Формула (4.14), как и условия (4.12), (4.13), может использоваться только для ориентировочной оценки и выбора парамет-

ров опыта, таким образом, чтобы были определены все параметры, характеризующие гетерогенную схему.

Для наиболее полной обработки выходной кривой строится график зависимости величины $\zeta_1 = 1/\xi_1^2$, где $\xi_1 = \text{infersc}(\bar{C})$ функция, обратная функции $\text{erfc}(\xi_1)$, от времени t . Согласно следующему из (4.12) выражению

$$\zeta_1 = \frac{1}{\xi_1^2} = \zeta_1^0 \left(\frac{t}{t_0} - 1 \right), \quad (4.15)$$

$$\zeta_1^0 = \frac{mnQ_n}{\pi r^2 D_m n'}, \quad t_0 = \frac{\pi r^2 \bar{t} mn}{Q_n},$$

этот график имеет вид прямой, исходящей из точки $t = t_0$, где t_0 — момент времени подхода индикатора к наблюдательной скважине по проницаемому слою (см. рис. 64, б); продолжение графика $\zeta_1(t)$ пересекает ось ζ_1 в точке с ординатой $-\zeta_1^0$.

По величинам отрезков ζ_1^0 и t_0 могут быть определены комплексные параметры $\bar{t}mn$ и $n'(mn)^2$, которые рассчитываются по формулам

$$\bar{t}mn = \frac{Q_n t_0}{\pi r^2 \bar{t}}, \quad \frac{n'}{(mn)^2} = \frac{1}{\zeta_1^0 t_0 D_m}. \quad (4.16)$$

В тех случаях, когда применяется несорбируемый или тепловой индикатор, как уже отмечалось, значения эффективных пористостей могут задаваться по литературным данным, по результатам геофизических исследований в скважинах или лабораторных анализов керна. При таких условиях могут быть определены относительное содержание проницаемых слоев m и их мощности t . Для этого используются формулы

$$\bar{t} = \frac{Q_n t_0}{\pi r^2 \bar{t} mn}, \quad m = \sqrt{\frac{\zeta_1^0 t_0 D_m n'}{n}}. \quad (4.17)$$

Схема макродисперсии применима в том случае, когда не выполняется условие (4.12). При этом для обработки опытных данных рекомендуется использовать лишь ту часть выходной кривой, которая отвечает условию

$$t > t^0 = \frac{\pi r^2 \bar{t} n}{Q_n}, \quad (4.18)$$

т. е. после прохождения через наблюдательную скважину индикаторного раствора с относительной концентрацией, равной $\bar{C} = 0.5$.

При относительно больших расстояниях до наблюдательных скважин и сравнительно малых расходах налива к моменту подхода фронта индикатора к наблюдательным скважинам диффундирующий в слабопроницаемые слои индикатор успевает охватить

весь их объем. В этом случае для обработки опытных данных может использоваться практически вся выходная кривая. Это положение справедливо при условии $\eta > 0,7$, где величина η определяется формулой (4.12).

При определении миграционных параметров по схеме макродисперсии удобно использовать асимптотические формулы. Так, при значительной длительности процесса и при больших расстояниях от центральной скважины может использоваться приближенная формула зависимости относительной концентрации от времени t вида [12, 49, 51, 63]:

$$\bar{C} = 0,5 \operatorname{erfc}(\xi_2), \quad \xi_2 = \frac{\pi r^2 l n^*}{2 \sqrt{\delta_2 n^* t}}. \quad (4.19)$$

Кривая изменения относительной концентрации в наблюдательной скважине, описываемая выражением (4.19), характеризуется тем, что в момент времени $t = t^0$ относительная концентрация равна $\bar{C} = 0,5$. Это выполняется с погрешностью не более 5% при условии

$$r > 4 \sqrt{\frac{Q_h \delta_2}{t}}. \quad (4.20)$$

Для наиболее полной обработки выходной кривой по формуле (4.19) строится график зависимости $\zeta_2 = \sqrt{t} \xi_2 = \sqrt{t} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 - 2\bar{C}} \right)$ от t , который должен иметь вид прямой (см. рис. 64, *г*), поскольку

$$\zeta_2 = \sqrt{t} \xi_2 = \zeta_2^0 \left(1 - \frac{t}{t^0} \right) \approx \sqrt{t} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 - 2\bar{C}} \right),$$

$$\zeta_2^0 = \frac{\pi r^2 l}{2 Q_h} \sqrt{\frac{n^*}{\delta_2}}, \quad t^0 = \frac{\pi r^2 l n^*}{Q_h}. \quad (4.21)$$

График зависимости ζ_2 от t вблизи точки пересечения с осью t имеет некоторое отклонение от прямой, но хорошо укладывается на прямую при малых и больших значениях времени (см. рис. 64, *г*). В соответствии с (4.21) этот график пересекает оси ζ_2 и t в точках ζ_2^0 и t^0 . По величинам этих отрезков могут быть определены эффективная пористость пласта n^* и параметр макродисперсии δ_2 . Для этого используются формулы

$$n^* = \frac{Q_h t^0}{\pi r^2 l}, \quad \delta_2 = \frac{\pi r^2 l t^0}{4 Q_h (\zeta_2^0)^2}. \quad (4.22)$$

Относительные ошибки определения параметров $\delta_2(\sigma_\delta)$ и $n^*(\sigma_n)$ по аналитическим зависимостям могут быть оценены по формулам

$$|\sigma_\delta| < 3 |\sigma_n|, \quad \sigma_n = \frac{Q_h \delta_2}{\pi r^2 l}. \quad (4.23)$$

В том случае, когда при обработке эксперимента график зависимости ξ_2 от t существенно отклоняется от прямой (что свидетельствует о большом параметре макродисперсии), для обработки выходной кривой может быть применена другая асимптотическая формула

$$\bar{C} \approx \operatorname{erfc}(\xi_3), \quad \xi_3 = \frac{\pi r^2 t}{2Q_n \sqrt{t \delta_2 / n^*}}. \quad (4.24)$$

Это выражение с погрешностью не более 5% может использоваться при условии

$$t < 2,5 \cdot 10^{-4} \delta_2 n^*, \quad (4.25)$$

выполнимость которого, как и условия (4.20), может быть оценена после обработки опытных данных.

Для обработки выходной кривой по формуле (4.24) строится график зависимости $\xi_3 = \sqrt{t} \xi_2 = \sqrt{t} \operatorname{erfc}(\bar{C})$, который для малых значений времени имеет вид прямой, параллельной оси t и отстоящей от нее на расстоянии ξ_3^0 (рис. 64, δ). Определив величину отрезка ξ_3^0 , рассчитывают комплексный параметр δ_2 / n^* по формуле

$$\frac{\delta_2}{n^*} = \left[\frac{\pi r^2 t}{2Q_n \xi_3^0} \right]^2. \quad (4.26)$$

В тех случаях, когда применяется несорбируемый или тепловой индикатор, в соответствии с (4.26) может быть определен параметр макродисперсии δ_2 .

При обосновании параметров кустового опробования необходимо оценивать общую длительность опыта. Для гетерогенной схемы можно считать

$$t_{\text{оп}} = \frac{\pi r^2 l m n}{Q_n} \left(\frac{400 \pi r^2 l m n' D_m}{m^2 n Q_n} + 1 \right). \quad (4.27)$$

Для схемы макродисперсии в соответствии с формулой (4.18) оценивается время появления в наблюдательных скважинах относительной концентрации, равной $\bar{C} = 0,5$ (t^0). Общее время опыта при этом практически во всех случаях составит по крайней мере величину, в 2 \div 10 раз превышающую t^0 .

При обосновании параметров опыта целесообразно первоначально выбрать расстояния до наблюдательных скважин. Затем в соответствии с вероятными значениями параметров пласта подбирается величина расхода налива таким образом, чтобы величина η , определяемая выражением (4.12), была либо менее 0,025 (для гетерогенной схемы), либо более 0,7 (для схемы макродисперсии). По выбранным значениям расстояний до наблюдательных скважин и расходу налива оценивается общая длительность опыта. Если опыт оказывается слишком длительным, необходимо либо уменьшить расстояния до наблюдательных скважин, либо увеличить рас-

ход налива, но таким образом, чтобы величина η оставалась в допустимых для данной схемы пределах.

При проведении кустового опробования пласта по схеме индикаторной волны в течение некоторого времени t_n запускается индикаторный раствор, после чего в скважину с тем же расходом производится налив воды, соответствующей по составу пластовой. Расчетные зависимости могут быть получены на основе принципа суперпозиции. Так, если решение задачи для непрерывного налива индикаторного раствора имеет вид $\bar{C} = \Phi(r, t)$, то решение задачи для схемы индикаторной волны должно быть представлено в виде

$$\bar{C} = \Phi(r, t) - \Phi(r, t - t_n). \quad (4.28)$$

Поскольку решения даже для случая непрерывного налива индикаторного раствора весьма сложны для обработки, то тем более трудно поддаются обработке опытные данные, полученные при использовании индикаторной волны. Кроме того, следует обращать внимание на то обстоятельство, что значения эффективных пористостей переднего и заднего фронтов индикаторной волны могут быть существенно различными вследствие частичной или полной необратимости сорбционных процессов. Это обстоятельство в еще большей степени осложняет методику определения миграционных параметров.

В связи с этим рассмотрим методику определения параметров лишь в наиболее простой постановке. Как и ранее, перед обработкой опытных данных по характеру выходной кривой здесь оценивается возможность применения той или иной расчетной схемы процесса.

Для гетерогенной схемы процесса характерна асимметричная кривая с быстрым увеличением концентрации и медленным ее уменьшением (рис. 65, а). Теоретическая кривая имеет в точке максимума резкий «пик». Однако практически в связи с проявлением процессов микродисперсии может наблюдаться некоторый размыт выходной кривой.

В отличие от гетерогенной схемы для схемы макродисперсии характерна меньшая асимметрия выходной кривой. Обычно восходящая ветвь выходной кривой составляет не менее $0,1 \div 0,5$ общего времени процесса (рис. 65, б). При этом в точке максимальной концентрации не наблюдается столь резкий «пик» относительной концентрации. Кривая в целом более пологая, чем в случае гетерогенной схемы.

При обработке опытных данных определяется момент времени t_{\max} , соответствующий максимальному значению относительной концентрации \bar{C}_{\max} .

Для гетерогенной схемы процесса величина времени t_{\max} равна

$$t_{\max} \approx t_0 + t_n. \quad (4.29)$$

Зная величину t_{\max} , можно определить комплексный параметр $\bar{m}n$ по формуле

$$\bar{m}n = \frac{Q_n (t_{\max} - t_n)}{\pi r^2 l}. \quad (4.30)$$

По значению относительной концентрации \bar{C}_{\max} находится величина $\xi_{\max} = \text{infcsc } \bar{C}_{\max}$, после чего может быть определен комплексный параметр $n'/(mn)^2$ по формуле

$$\frac{n'}{(mn)^2} = \frac{t_n \xi_{\max}^2}{D_m (t_{\max} - t_n)^2}. \quad (4.31)$$

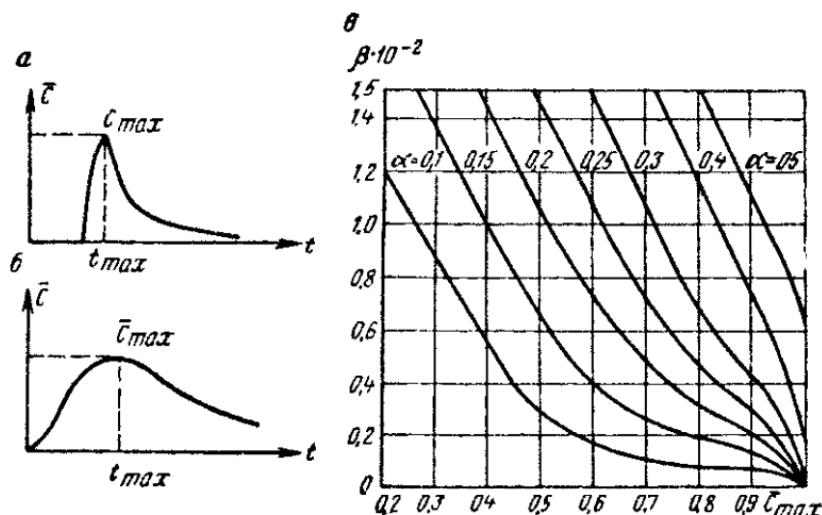


Рис. 65. Выходные кривые при запуске индикаторной волны.
 а — гетерогенная схема; б — схема макродисперсии; в — графики для определения миграционных параметров при запуске индикаторной волны

При использовании несорбируемого или теплового индикатора по результатам опробования могут быть определены относительное содержание \bar{m} и мощности m проницаемых слоев.

Для обработки опытных данных по схеме макродисперсии время t_{\max} , соответствующее прохождению максимальной относительной концентрации \bar{C}_{\max} , будет [63]:

$$t_{\max} = t^0 + 0,5t_n, \quad (4.32)$$

где t^0 определяется согласно выражению (4.21).

В соответствии с (4.46) значение эффективной пористости может быть рассчитано по формуле

$$n^* = \frac{Q_n (t_{\max} - 0,5t_n)}{\pi r^2 l}. \quad (4.33)$$

Далее по значению относительной концентрации \bar{C}_{\max} определяется параметр макродисперсии δ_2 . Для этого используется график, представленный на рис. 65, в [63]. По величинам $\alpha = t_n/(t_{\max} - 0,5 t_n)$ и \bar{C}_{\max} определяется величина $\beta = \delta_2 Q_n / \pi r^2 l$. Определив величину β , рассчитывают параметр макродисперсии δ_2 по формуле

$$\delta_2 = \frac{\pi r^2 \beta}{Q_n}. \quad (4.34)$$

г. Методика определения миграционных параметров при односкважинном опробовании

При проведении односкважинного опробования в течение некоторого времени t_n в скважину с расходом Q_n производится налив индикаторного раствора, после чего с расходом $Q_{\text{от}}$ производится откачка из той же скважины. Наиболее простая обработка опытных данных имеет место тогда, когда расходы налива и откачки существенно отличаются (более чем в $5 \div 10$ раз), причем наибольший практический интерес имеет рассматриваемый в дальнейшем случай, когда расход откачки больше расхода налива.

При использовании гетерогенной схемы дисперсия, возникающая в процессе медленного налива, в процессе быстрой откачки практически не искажается. Таким образом, при откачке происходит как бы представление во времени зависимости относительной концентрации от расстояния, сформировавшейся при наливе. Такой специфический характер процесса связан с тем, что в гетерогенной схеме процессы диффузии в слабопроницаемые слои имеют тем меньшее значение, чем выше скорости фильтрации, т. е. чем больше расходы налива и откачки.

В случае схемы макродисперсий имеет место противоположная картина: при наливе дисперсия оказывается незначительной, т. е. в таком случае будет наблюдаться довольно резкий фронт индикатора, а во время откачки наблюдается значительная дисперсия индикаторного раствора. Это связано с тем, что дисперсия резко возрастает с увеличением скорости фильтрации (коэффициент дисперсии пропорционален квадрату скорости фильтрации). При этом следует иметь в виду, что в отличие от гетерогенной схемы диффузионные процессы в слабопроницаемых слоях захватывают весь их объем как при наливе, так и при откачке.

Перед обработкой опытных данных по диагностическим признакам выходной кривой обосновываются рекомендации по использованию той или иной расчетной схемы процесса.

Для гетерогенной схемы характерна выпуклая кривая с постоянно нарастающей скоростью уменьшения относительной концентрации (рис. 66, а, кривая а). Так, время изменения концентрации от $\bar{C} = 1,0$ до $\bar{C} = 0,5$ составляет до 0,95 общего времени процесса. В конечной стадии процесса может наблюдаться некоторая дисперсия кривой (см. рис. 66, а, кривая б), что связано с

проявлением процессов микродисперсии и частичным выносом индикатора из слабопроницаемых слоев.

Для схемы макродисперсии характерна выпукло-вогнутая кривая (см. рис. 66, б, кривая *a*). При этом относительная концентрация уменьшается от $\bar{C} = 1,0$ до $\bar{C} = 0,5$ за время, составляющее $0,5 \div 0,1$ общего времени процесса. В начальной части выходная кривая несколько отличается от теоретической (см. рис. 66, б, кривая *b*), что обычно связано с конечными скоростями конвективного переноса в проницаемых слоях и с инерционностью процессов массоотдачи из слабопроницаемых слоев.

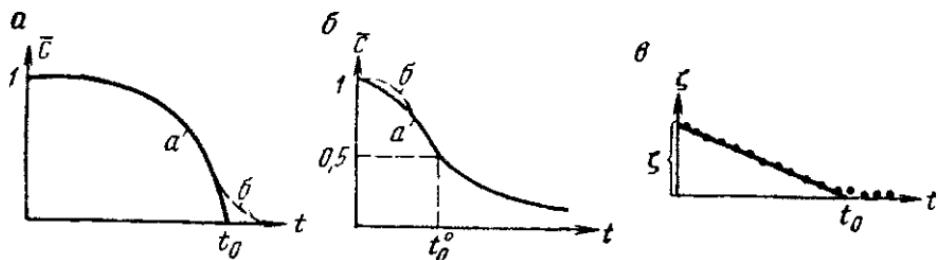


Рис. 66. Выходные кривые при односкважинном опробовании.

а — гетерогенная схема; *б* — схема макродисперсии; *в* — обработка выходных кривых при односкважинном опробовании (гетерогенная схема)

После оценки применимости той или иной расчетной схемы процесса проводится аналитическая обработка данных выходной кривой для определения миграционных параметров.

Решение рассматриваемой задачи для гетерогенной схемы процесса имеет вид [50]

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}(\xi), \quad \xi = \frac{Q_{\text{от}} t}{m Q_{\text{н}} n^0} \sqrt{\frac{D_m n'}{t_n - \frac{Q_{\text{от}} n}{Q_{\text{н}} n^0} t}}, \quad (4.35)$$

где n и n^0 — значения эффективной пористости проницаемых слоев при наливе и откачке (их различие связано необратимостью сорбционных процессов); t — текущее время при откачке.

Расчетная формула (4.35) применима при условии воспроизведения гетерогенной схемы в процессе налива, поскольку при откачке это условие будет заведомо справедливым. Поэтому при проведении односкважинного опробования должно выполняться условие (4.12), где под величиной r понимается радиус опробования, который может оцениваться по формуле

$$r = \sqrt{\frac{Q_{\text{н}} t_n}{\pi m l n}}. \quad (4.36)$$

Учитывая (4.36), можно представить условие применимости формулы (4.35) в виде

$$\frac{D_m t_n}{m' n l n} < 0,025. \quad (4.37)$$

Для обработки опытных данных по формуле (4.35) строится график зависимости $\zeta = t^2/\xi^2$, где $\xi = \text{inferfc}(\bar{C})$ от t , который имеет вид прямой, исходящей из точки $\zeta = \zeta^0$ (рис. 66, в), пересекающей ось t в точке t_0 . По величинам отрезков ζ^0 и t_0 определяется относительное изменение эффективной пористости проницаемых слоев n/n^0 и величина $n'/(mn^0)^2$ из формулы

$$\frac{n}{n^0} = \frac{Q_{\text{н}} t_{\text{н}}}{Q_{\text{от}} t_0}, \quad \frac{n'}{(mn^0)^2} = \frac{Q_{\text{н}}^2 t_{\text{н}}}{Q_{\text{от}}^2 D_{\text{н}} \zeta^0}. \quad (4.38)$$

При использовании несорбируемого или теплового индикатора по данным опыта могут быть далее определены размеры проницаемых слоев

$$m = \frac{Q_{\text{от}}}{Q_{\text{н}} n^0} \sqrt{\frac{D_{\text{н}} \zeta^0 n'}{t_{\text{н}}}}. \quad (4.39)$$

В том случае, когда в процессе односекважинного опробования должны определяться миграционные параметры, характеризующие схему макродисперсии, необходимо и достаточно выполнение условий, характеризующих эту схему при откачке. Поскольку величина радиуса опробования в этом случае равна

$$r = \sqrt{\frac{Q_{\text{н}} t_{\text{н}}}{\pi l n^*}}, \quad (4.40)$$

то условие применимости схемы макродисперсии может быть записано в виде

$$\frac{Q_{\text{н}} D_{\text{н}} t_{\text{н}} \bar{m}}{Q_{\text{от}} n' m n^*} > 0,7. \quad (4.41)$$

Решение задачи для односекважинного опробования при наличии схемы макродисперсии сложно и неудобно для обработки, поэтому определение параметров проводится по асимптотическим формулам.

Так, при значительном времени налива для обработки выходной кривой может применяться приближенная формула [50]

$$\bar{C} \approx 0,5 \text{ erf}(\xi), \quad \xi = \frac{n^{*0} Q_{\text{н}} t_{\text{н}} - t}{\frac{n^{*0} Q_{\text{от}}}{2} \sqrt{d_{\text{н}} n^{*0} t}}, \quad (4.42)$$

которая с погрешностью не более 5% справедлива при условии

$$t_{\text{н}} > 0,25 \frac{Q_{\text{от}} \delta_2 n^0}{Q_{\text{н}}}. \quad (4.43)$$

Для наиболее полной обработки опытных данных по формуле (4.42) строится график зависимости $\zeta = \sqrt{t \bar{C}}$, где $\xi = \text{inferf}(2 \bar{C})$, от t , который имеет вид прямой, пересекающей оси ζ и t в точках ζ^0 и t^0 (см. рис. 64, г). Следует иметь в виду, что при больших

значениях параметра макродисперсии вблизи точки пересечения графика ζ от t с осью t может наблюдаться заметное отклонение графика от прямой.

По величинам отрезков t^0 и ζ^0 определяется относительное изменение эффективной пористости пласта n^{*0}/n^* и величина $\delta_2 n^{*0}$ из формул

$$\frac{n^{*0}}{n^*} = \frac{Q_{\text{от}} t^0}{Q_{\text{н}} t_{\text{н}}}, \quad \delta_2 n^{*0} = \left(\frac{t_0}{2 \zeta^0} \right)^2. \quad (4.44)$$

Применение несорбируемого или теплового индикатора дает возможность непосредственно определить параметр макродисперсии δ_2 .

При малом времени откачки для обработки выходной кривой может использоваться другое асимптотическое решение:

$$\bar{C} = \operatorname{erf}(\xi), \quad \xi = \frac{\frac{n^{*0} Q_{\text{н}}}{n^* Q_{\text{от}}} t_{\text{н}}}{2 \sqrt{\delta_2 n^{*0} t}}, \quad (4.45)$$

которое применимо с погрешностью не более 5% при условии

$$t < 2,5 \cdot 10^{-4} \delta_2 n^{*0}. \quad (4.46)$$

Для определения параметров по формуле (4.45) строится график зависимости $\zeta = \sqrt{t \xi}$ от t , который для малых значений времени имеет вид прямой, параллельной оси t , и отстоящей от нее на величину ζ^0 (см. рис. 64, δ). Определив величину отрезка ζ^0 , рассчитывают комплексный параметр $\delta_2(n^*)^2/n^{*0}$ по формуле

$$\frac{\delta_2(n^*)^2}{n^{*0}} = \left(\frac{Q_{\text{н}} t_{\text{н}}}{2 Q_{\text{от}} \zeta^0} \right)^2. \quad (4.47)$$

В том случае, когда применяется несорбируемый или тепловой индикатор, по данным опыта может быть непосредственно определен параметр макродисперсии δ_2 .

При обосновании параметров однокважинного опробования используются формулы, характеризующие условия применимости каждой расчетной схемы. Кроме этих условий, должно учитываться условие, характеризующее длительность откачки. Так, для гетерогенной схемы длительность откачки определяется формулой

$$t_{\text{от}} = \frac{n^0 Q_{\text{н}}}{n Q_{\text{от}}} t_{\text{н}}. \quad (4.48)$$

При использовании же несорбируемого индикатора либо индикатора, для которого сорбционные процессы являются практически обратимыми (в частности, теплового индикатора), максимальное время откачки согласно (4.48) соответствует тому моменту, когда объем откаченного раствора будет равен объему закачанного раствора.

Для оценки времени откачки при воспроизведении схемы макродисперсии рассчитывается момент времени, соответствующий относительной концентрации в откачиваемом растворе, равной $\bar{C} = 0,5 (t^0)$. Оценка величины t^0 проводится по формуле (4.48), поскольку в этом случае правая часть выражения (4.48) равна t^0 . Общее время откачки практически во всех случаях составит не менее $(2 \div 10) t^0$.

По имеющимся предварительным сведениям о параметрах пласта первоначально подбирается длительность налива индикаторного раствора таким образом, чтобы выполнялись условия, характеризующие данную расчетную схему [условия (4.37) или (4.41)]. Затем по формулам, характеризующим величину радиуса опробования, подбирается расход налива таким образом, чтобы при наливе радиус опробования был по крайней мере значительно больше нарушенной в процессе бурения прискважинной зоны.

§ 5. ОЦЕНКА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД НАЛИВАМИ В ШУРФЫ

а. Постановка и основные теоретические положения опыта

Наливы в шурфы являются наиболее распространенным способом оценки водопроницаемости ненасыщенных пород зоны аэрации.

Для выполнения опыта шурф проходится до отметки, соответствующей началу исследуемого интервала глубин, и оборудуется одно- или двухкольцевым концентрическим инфильтрометром диаметром не менее 35 см, для чего на тщательно выровненной и зачищенной площадке устанавливаются и осторожно вдавливаются металлические кольца на глубину 2—3 см. Не допускается при этом деформации пород в контуре инфильтрометра (например, уплотнения или затирки инструментом площадки впитывания воды). Дно зумпфа покрывается песком или мелким гравием слоем 1—2 см. Вода, используемая для опыта, должна быть чистой и не высокоминерализованной. При заливе воды в инфильтрометр следует принимать необходимые меры по предотвращению размыва площадки впитывания.

Известен ряд рекомендаций по проведению опытов и обработке полевой информации, для наливов при постоянном гидравлическом напоре или расходе воды и мгновенных наливов с последующим свободным понижением уровня, причем коэффициент фильтрации определяется по данным установившейся или неустановившейся инфильтрации [7, 10, 15, 20, 28].

Проведение наливов в шурфы — как способ оценки водопроницаемости пород — предложен и внедрен в практику полевых исследований проф. Н. С. Нестеровым [15]. В основу способа положена предпосылка об одномерности потока, огражденного буферной зоной, для чего шурф оборудуется двухкольцевым концентри-

ческим инфильтрометром. Наливы проводятся при равном и постоянном гидравлическом напоре в обоих кольцах до стабилизации расхода воды из внутреннего (учетного) кольца. Коэффициент фильтрации оценивается установившейся скоростью впитывания воды.

В иной постановке проводились наливы в шурфы, А. К. Болдыревым [11], которым рекомендовано для производства опыта в шурфе устраивать прямоугольный зумпф и выполнять налив при постоянном гидравлическом напоре до стабилизации расхода воды. Установившаяся скорость впитывания воды принималась им в качестве верхнего предела коэффициента фильтрации, величину которого следовало уточнить по действительной скорости движения жидких частиц. Эта скорость устанавливалась по времени появления и ординате мокрого пятна на стенке шурфа, проходившего на некотором расстоянии от опытного зумпфа.

Н. М. Трофимов, рассматривая результаты опытов, выполненных по способу Н. С. Нестерова, впервые отметил [28], что влиянию капиллярных сил подвержены все точки области фильтрации, и строго вертикального направления потока из внутреннего кольца быть не может, направление этого потока будет только приближаться к вертикальному по мере увеличения радиуса наружного кольца и его отношения к радиусу внутреннего. Соответственно наблюдается изменение показателей водопроницаемости, обусловленное уменьшением доли расхода воды на боковое растекание в общем балансе потока из инфильтрометра.

В дальнейшем различные модели растекания потока под шурфом и соответствующие им методы обработки результатов наливов в шурфы предлагались К. И. Добровольским, Е. А. Замарином, Н. Н. Биндеманом, Н. Я. Денисовым [28].

Наиболее строгое гидромеханическое решение для стационарного осесимметричного потока со свободной поверхностью под шурфом рассмотрено Н. К. Гиринским [20]. На основе гидромеханического решения плоской задачи стационарной фильтрации в однородной среде из канала с непроницаемыми боковыми стенками и последующего сопоставления сетки движения, построенной аналитическим путем, с соответствующей сеткой для пространственного потока из шурфа, им найдена зависимость для расхода Q потока, инфильтрующегося из шурфа, которую при $\frac{H_0}{d} < 4$ можно аппроксимировать следующим выражением:

$$Q = k \frac{5.4H_0 + 1.1d}{d + 2p} \omega, \quad H_0 = h_0 + h_k, \quad (5.1)$$

где d и ω — диаметр и площадь инфильтрометра; h_0 — глубина воды в инфильтрометре; h_k — высота капиллярного поднятия; p — глубина задавливания инфильтрометра в грунт.

Важным этапом в развитии способов оценки водопроницаемости пород по данным одномерной инфильтрации явилось исполь-

зование уравнения У. Грина и Г. Ампта *, описывающего вертикальное неустановившееся просачивание воды

$$\mu \frac{dl}{dt} = k \frac{h + h_k + l}{l}, \quad (5.2)$$

где h и l — соответственно гидравлический напор и глубина фронта смачивания на момент времени t ; μ — коэффициент недостатка насыщения.

Уравнение (5.2) выражает изменение скоростей впитывания воды, определяемое из баланса потока и по закону Дарси при напорном

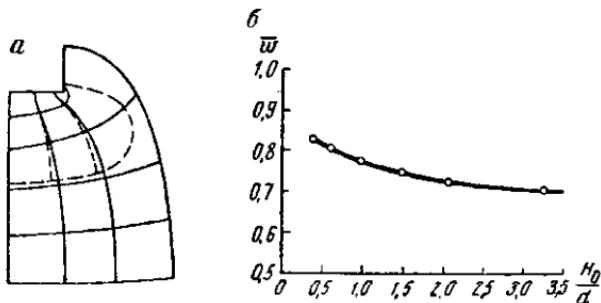


Рис. 67. Инфильтрационный поток из шурфа.
а — гидродинамическая сетка движения из шурфа
с инфильтрометром, не вставленным в грунт
(по Н. К. Тиринскому); б — зависимость относительно
влагосодержания $\bar{w} = f(H_0/d)$

градиенте $I = \frac{h + h_k + l}{l}$. Предельные значения градиента будут: $I \rightarrow \infty$ при $t = 0$ и $l = 0$ и $I = 1$ при $t \rightarrow \infty$ и $l \rightarrow \infty$. Из этого следует, что скорость впитывания воды, уменьшаясь в процессе инфильтрации, асимптотически стремиться к своему пределу, равному по величине коэффициенту фильтрации.

Ф. Цункером [15] и Н. Н. Биндером [10] на основе интегрирования уравнения (5.2) для случая $h = h_0 = \text{const}$ получены способы оценки величины k , h_k и μ по измеренным расходам или поглощенным объемам воды на два момента времени.

В дальнейшем уравнение (5.2) применено Н. Н. Веригиным [15] для описания неустановившейся инфильтрации при мгновенном наливе со свободным понижением уровня воды и наливе с постоянным расходом.

Анализ результатов теоретических исследований и экспериментальных наблюдений показывает [20, 21, 70, 71], что при инфильтрации из шурфа поток заметно деформируется, однако уже на небольшой глубине (порядка 1—1,5 диаметра инфильтрометра) практически достигает своих предельных размеров, а линии тока становятся вертикальными (рис. 67).

* В литературных источниках авторство этого уравнения обычно приписывается Ф. Цункеру [10, 15].

Непосредственно под шурфом наблюдается область давлений выше атмосферного, но в породах с относительно высоким капиллярным давлением размеры ее незначительны. Далее по направлению потока давление, уменьшаясь на глубине, достигает своего минимума на фронте увлажнения. Изменениям давлений следуют изменения влагосодержания пород: непосредственно под площадкой впитывания воды в зоне положительных давлений наблюдается полное насыщение порового пространства, которое, уменьшаясь по направлению течения, достигает своего минимума на глубине предельного бокового растекания.

Благосодержание области фильтрации на глубине предельного бокового растекания потока для одной и той же поровой среды зависит от гидравлического напора, капиллярного всасывания пород и диаметра зумпфа (см. рис. 67, б).

Неоднородность пород может существенно изменить представления о картине потока от рассмотренной выше модели. В неоднородной породе, представленной блоками с различной проницаемостью, процесс инфильтрации заметно интенсивнее, чем в однородной среде со средними значениями параметров. Наличие некапиллярных пор резко увеличивает проницаемость пород. При этом интенсивность водопоглощения увеличивается во много раз [7]. При слоистом сложении фильтрующей толщи на контакте слоев могут наблюдаться явления разрыва сплошности или деформации потока. Интересны в этом отношении результаты ряда исследований одномерной инфильтрации в насыпных колоннах с двухслойным инфильтрационным строением, позволяющие отметить следующее: а) процесс инфильтрации в покровном слое до выхода фронта смачивания на контакт слоев развивается как в однородной среде неограниченной мощности; б) вскоре после выхода фронта смачивания на поверхность подстилающего менее проницаемого слоя в верхнем слое создается состояние полной насыщенности; в) инфильтрационные расходы в слоистых системах регламентируются слоем с минимальной проницаемостью.

6. Расчетные зависимости и методика обработки опытных наливов

Инфильтрация из шурфа в однородные породы характеризуется неравномерным поглощением воды по радиусу зумпфа, неизбежным боковым растеканием потока и неполным насыщением области фильтрации. Учитывая, что под шурфом наблюдается практически полное водонасыщение, а боковое растекание потока происходит на фоне уменьшения текущего влагосодержания области фильтрации, динамика водопоглощения из шурфа в процессе неустановившегося движения воды может быть с достаточной для практических целей точностью описана линейным уравнением одномерной инфильтрации вида (5. 1).

Для удобства использования уравнения (5.1) целесообразно изменение гидравлического уклона связать в нем с поглощением воды в процессе инфильтрации, имея в виду, что объем просочившейся воды $W = \mu \omega l$, после чего уравнение (5.2) приводится к виду [64]

$$V = k + \frac{k\mu\omega (h_0 + h_k)}{W}. \quad (5.3)$$

Из уравнения (5.3) следует, что скорость инфильтрации линейно связана с величиной, обратной объему просочившейся воды, и график зависимости V от $\frac{1}{W}$ должен иметь вид прямой, отсекающей на оси V величину коэффициента фильтрации k .

Более удобной для практических целей является иная форма записи уравнения (5.3)

$$VW = A + kW. \quad (5.4)$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой в координатах $VW - W$ с наклоном k , отсекающей на оси VW отрезок $A = k\mu^* \omega H_0$, при $H_0 = h_0 + h_k$. Здесь μ^* — предельная величина недостатка насыщения.

Теоретические зависимости скоростей впитывания воды от времени и соответствующие им поглощенные объемы воды (одномерная инфильтрация), полученные Дж. Филипом [69] путем численного решения уравнения влагопереноса, хорошо преобразуются в прямые в координатах $VW - W$, что подтверждает возможность использования уравнения (5.4) для практических расчетов.

Для экспресс-определений могут также использоваться мгновенные наливы в шурфы со свободным понижением уровня воды, процесс инфильтрации при которых аналогично (5.4) выражается линейной зависимостью

$$VS = A' + \varphi S, \quad (5.5)$$

где $A' = k\mu^* H_0 = \text{const}$; $\varphi = (1 - \mu)k$ — наклон прямой $VS = f(S)$; V и S — соответственно скорость свободного снижения уровня воды и величина этого понижения.

Реальные значения недостатка насыщения пород, служащих объектом исследований для целей ирригации, лежат в пределах 0,1—0,3. Осреднение всего диапазона до $\mu_{cp} = 0,2$ вносит погрешность в величину k менее $\pm 20\%$, что можно считать вполне приемлемым.

В этом случае выражение (5.5) можно переписать в следующем виде:

$$VS = A' + 0,8kS, \quad (5.6)$$

откуда

$$k = \frac{\varphi}{0,8}, \quad \text{а} \quad H_0 = \frac{0,8A'}{\varphi\mu^*}. \quad (5.7)$$

Величина k , определенная по (5.4) или (5.7), уточняется введением поправочных коэффициентов α и θ , учитывающих соответственно боковое растекание потока под шурфом и неполное насыщение области фильтрации на глубине предельного растекания, равного $(1-1,5)d$. Тогда расчетное значение коэффициента фильтрации $k_{\text{расч}}$ представится выражением

$$k_{\text{расч}} = \frac{\alpha}{\theta} k. \quad (5.8)$$

Величина α определяется на основании решения Н. К. Гиринского, исходя из выражения (5.1), по формуле

$$\alpha = \frac{d + 2p}{5,4H_0 + 1,1d}. \quad (5.9)$$

Коэффициент θ зависит от относительного влагонасыщения $\bar{w} = \frac{w}{w_b}$, где w — влажность при опытном наливе на глубине $z = (1 - 1,5)d$ от дна зумпфа, а w_b — влажность при полном водонасыщении, причем в первом приближении можно считать [2,7].

$$\theta = \bar{w}^{3,5}. \quad (5.10)$$

На рис. 67, б приведен пример зависимости относительного влагосодержания на глубине $z = 1,5d$ от соотношения H_0/d для верхнечетвертичных эолово-делювиальных суглинков Ставрополья, полученной экспериментально наливами в шурфы с различными диаметрами инфильтрометров.

В качестве примера оценки водопроницаемости пород по изложенной методике приведем данные опытных наливов на площадях орошения восточного Предкавказья, в районах распространения верхнечетвертичных эолово-делювиальных суглинков имеющих естественную объемную влажность 15—19% и объемный вес 1,4—1,5 т/м³. Для изучения физической картины инфильтрации проводились наливы с использованием трех кольцевых концентрических инфильтрометров и наблюдениями за формированием области фильтрации с помощью нейтронного каротажа скважин.

В процессе неустановившейся инфильтрации наблюдалось относительное возрастание скоростей впитывания воды (при общем уменьшении расхода) с удалением участков радиуса от центра зумпфа. Эта тенденция ослабевает при проявлении неоднородности пород в разрезе, а иногда и нарушается при плановой их неоднородности.

На рис. 68, а приведены данные, иллюстрирующие динамику увлажнения пород по оси потока. Как видно, непосредственно под инфильтрометром устанавливается состояние практически полного насыщения порового пространства. Влагосодержание пород в процессе неустановившегося движения воды повышается до некоторого предела при общем уменьшении его по направлению потока. Величины w_b и w составили соответственно 46% и 38%, $\mu^* = 0,27$.

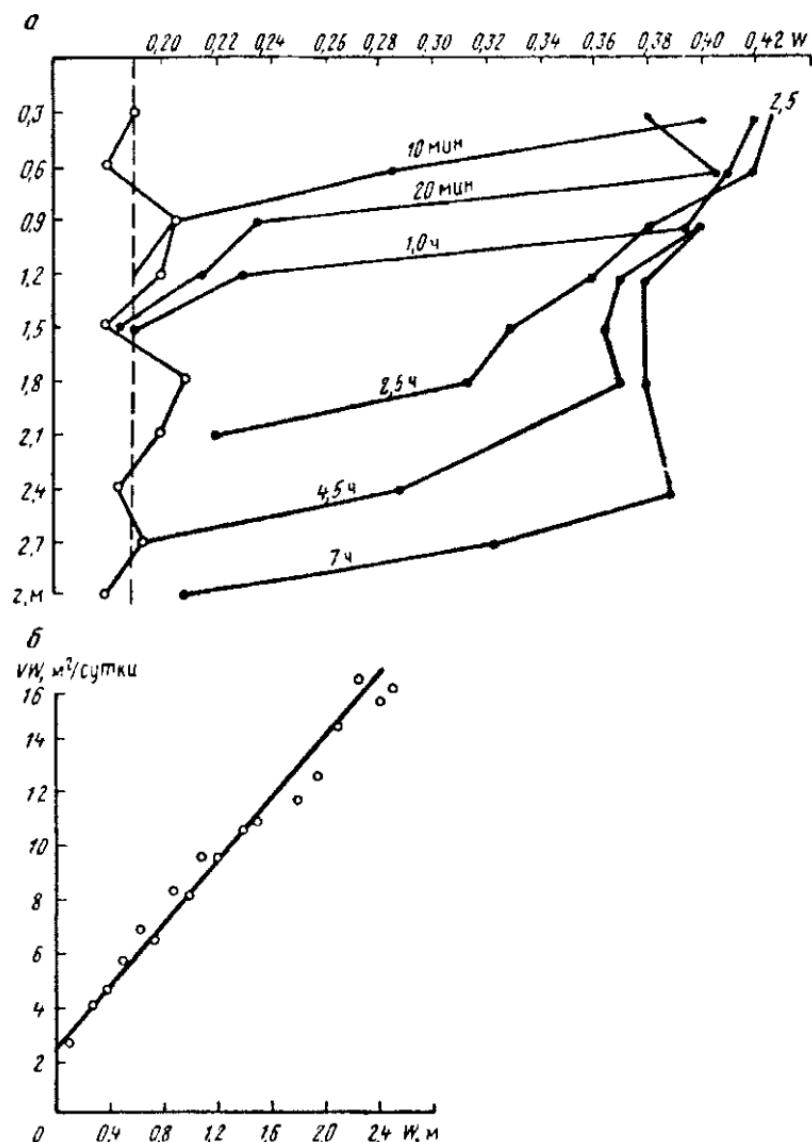


Рис. 68. Динамика увлажнения лесовидных суглинков под инфильтрометром.

а — распределение влажности по оси потока при $d = 1,2$ м, $h_0 = 0,1$ м; б — график зависимости VW от W .

Сопоставления объемов поглощения * в целом по всему зумпфу и по оси потока в данном случае показало, что в общем балансе водопоглощения расход воды на боковое растекание существенно превышает расход на просачивание в контуре инфильтрометра, причем скорости впитывания воды во внешнем кольце оказываются примерно вдвое больше, чем во внутреннем.

График $VW=f(W)$ удовлетворительно аппроксимируется прямой с наклоном, определяющим значение $k = 5,8$ м/сутки, отсекающей на оси VW отрезок $A = 2,4$ м²/сутки (рис. 68, б), откуда

$$H_0 = \frac{2,4}{5,8 \cdot 0,27} = 1,47 \text{ м.}$$

При

$$\alpha = \frac{1,2 + 2 \cdot 0,03}{5,4 \cdot 1,47 + 1,1 \cdot 1,2} = 0,14 \text{ и } \theta = \left(\frac{38}{46} \right)^{3,5} = 0,51$$

получим расчетное значение коэффициента фильтрации

$$k_{\text{расч}} = \frac{0,14}{0,51} 5,8 = 1,6 \text{ м/сутки.}$$

в. Рекомендации по проведению опытных наливов

При опытных наливах с постоянным напором в зумпф, оборудованный инфильтрометром, быстро заливается вода слоем 5—15 см и на протяжении всего опыта поддерживается на одном уровне. Для непрерывной подачи воды в инфильтрометр используются сосуды Мариотта, входящие в комплект оборудования ПВН-00, или мерные емкости с автоматическим регулятором уровня [12, 15]. При малых расходах воды опыт удобнее проводить периодическими доливами со свободным понижением уровня в пределах фиксируемых отметок, не допуская при этом осушения дна зумпфа.

Начальное количество воды, заливаемое в кольцо, не учитывается; наблюдения ведутся за расходами воды, подаваемыми в зумпф для поддержания уровня на заданной отметке. Расходы воды следует регистрировать через каждые 10—15 мин в течение первого часа, через 20—30 мин — в течение второго часа и через 30—60 мин — в последующее время. В опытах с периодическими доливами фиксируется время прохождения урезом воды заданного интервала отметок. По этим данным вычисляются скорости впитывания и соответствующие тем же моментам времени объемы воды, поглощенные за время от начала инфильтрации.

Минимальная продолжительность налива регламентируется временем поглощения объема воды, обеспечивающего практическую стабилизацию влагосодержания пород на глубине не менее

* Для удобства анализа данных здесь динамика поглощения характеризуется суммарными слоями воды, просочившейся через инфильтрометр и его центральную часть.

1,5 d. Это количество воды ориентировочно можно определить по формуле

$$W^0 = H_0 d^2. \quad (5.11)$$

Сразу же по окончании налива производится вскрытие смоченного разреза для определения w_n и w отбором проб пород на влажность непосредственно под площадкой впитывания воды и с глубины, равной $1-1,5 d$.

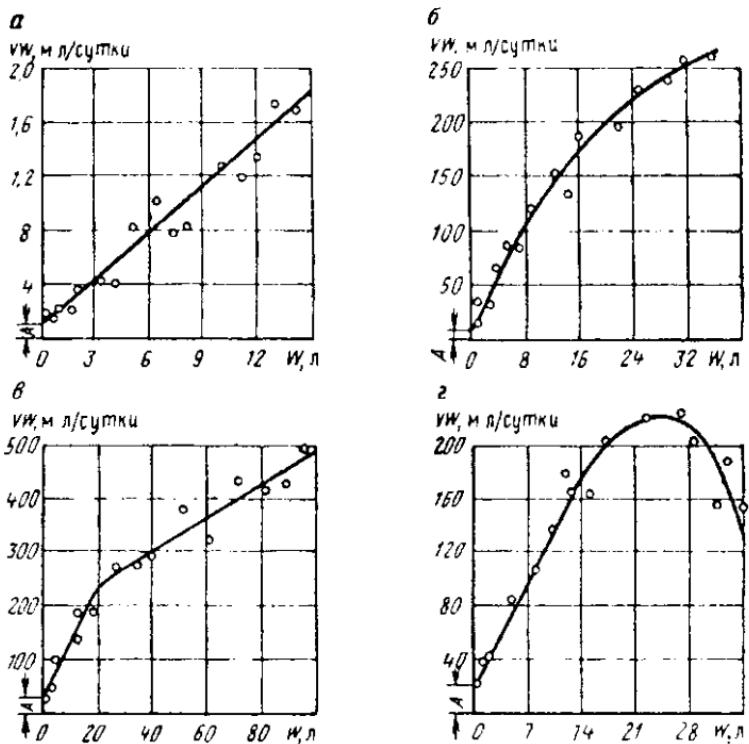


Рис. 69. Типичные графики зависимости VW от W по данным инфильтрации в золово-делювиальных суглинках.

а — однородная толща пород; б — породы с непрерывно уменьшающейся по глубине проницаемостью; в — двухслойная кусочно-однородная толща пород; г — толща пород с однородным слоем, подстилаемым слоем с уменьшающейся по глубине проницаемостью

Отклонение графиков $VW = f(W)$ от прямолинейных свидетельствует о нарушении фильтрационной однородности пород в разрезе. По виду этих графиков можно в общих чертах судить о характере профиля проницаемости: кусочно-однородное или непрерывное изменение проницаемости пород с глубиной (рис. 69).

При непрерывном уменьшении проницаемости пород в разрезе наклон касательной к графику $VW = f(W)$ в точке A (см. рис. 68, б) определяет величину k_0 на глубине $z = 0$. Профиль $k(z)$

изучается поинтервальным опробованием исследуемой толщи. По данным кратковременных наливов определяются A или A' соответственно по (5.4) или (5.7), а также k_0 , H_0 и a . Однако поправочный коэффициент в данном случае может быть определен только по заведомо известной зависимости $\bar{w} = f(H_0/d)$, которая находится проведением наливов в аналогичные, но однородные породы с использованием инфильтрометров различного диаметра.

При кусочно-однородном строении разреза водопроницаемость каждого слоя может быть определена наливом в шурф с диаметром инфильтрометра $d_i \leq 0,5 m_i$, где m_i — мощность опробуемого слоя. При этом не допускается выхода фронта смачивания на поверхность подстилающего менее проницаемого слоя, что достигается подачей в шурф ограниченного объема воды, определяемого по формуле (5.11).

При единовременных экспресс-наливах для наблюдений за снижением уровня воды во времени в кольце устанавливается маркированная рейка. Начало опыта соответствует заливу воды до заданной отметки. В процессе наблюдений фиксируется время залива инфильтрометра водой и время прохождения ее уровнем отметок глубин с интервалом в 1 см.

Обработка данных наблюдений заключается в построении промежуточного графика $S = f(t)$, с помощью которого определяются величины скорости снижения уровня воды в моменты прохождения им фиксируемых отметок и графика $VS = f(s)$ — для определения k и H_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глава I

1. Алексеев В. С. Методика прогноза химического колыматажа водозаборных скважин.—«Водоснабжение и санитарная техника», 1968, № 10, с. 28—31.
2. Анатольевский П. А., Шнееров О. М. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин для водоснабжения. Изд. Спецстройпроект, 1959, 145 с.
3. Анатольевский П. А., Оречкин П. Н., Шнееров О. М. Специальные работы при бурении скважин на воду. Методические указания. М., Госэнергопиздат, 1960, 63 с.
4. Анатольевский П. А., Малоян А. В., Шнееров О. М. Технология бурения скважин на воду. М., Гостоптехиздат, 1962, 246 с.
5. Башкатов Д. Н., Олоновский Ю. А., Дрягалин Е. Н. Разглинизация буровых скважин на воду. М., «Колос», 1969, 111 с.
6. Башкатов Д. Н., Володько И. Ф. и др. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ. М., Изд. ВСЕГИНГЕО, 1969, 184, с.
7. Башкатов Д. Н., Рохлин Л. И. Технико-экономические предпосылки обоснования выбора способа бурения и типа буровой установки для проходки гидрогеологических скважин.—В кн.: Бурение, опробование и оборудование гидрогеологических скважин. Изд. ВСЕГИНГЕО, вып. 13, 1969, 116 с.
8. Башкатов Д. Н., Тесля А. Г. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин на воду. М., «Недра», 1970, 145 с.
9. Башкатов Д. Н., Дрягалин Е. Н., Олоновский Ю. А., Романов В. Г. Временные методические указания по разглинизации гидрогеологических скважин комбинированным способом. Изд. ВСЕГИНГЕО, 1971, 39 с.
10. Башкатов Д. Н. Выбор способа и диаметра бурения при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. ВИЭМС, 1971, 32 с.
11. Белицкий А. С., Дубровский В. В. Проектирование разведочно-эксплуатационных скважин для водоснабжения. М., «Недра», 1968, 227 с.
12. Белкин О. К. и др. Опыт бурения гидрогеологических скважин. М., «Недра», 1970, 128 с.
13. Беляков В. М., Сапожников Н. Г. Временные технические рекомендации по сооружению бесфильтровых скважин на воду. М. Изд. ВНИИГИМ им. А. Н. Костякова, 1971, 34 с.
14. Блажков В. И. Вращательное бурение на воду в рыхлых отложениях.—«Гидротехника и мелиорация», 1967, № 9, 91 с.
15. Борщевский Г. А. Установка фильтров в колонковые скважины одновременно с их разглинизацией.—«Разведка и охрана недр», 1956, № 6, 32 с.
16. Властовский А. Н. Из опыта оборудования скважин фильтрами без вспомогательной колонны обсадных труб.—«Разведка и охрана недр», 1959, № 6, 42—48 с.
17. Воздвиженский Б. И., Васильев М. П. Буровая механика. М., Госголтехиздат, 1954, 488 с.
18. Волков С. А., Сулакшин С. С., Андреев М. М. Буровое дело, М., «Недра», 1965, 488 с.

19. Вортман З. М. Практика ударно-канатного бурения на воду. М., «Недра», 1966, 291 с.
20. Гаврилко В. М. Фильтры водозаборных, водопонизительных и гидрогеологических скважин. М., «Стройиздат», 1968, 395 с.
21. Гаврилко В. М., Киселев О. К. Фонтанирующие скважины в сельском хозяйстве. «Колос», 1968, 213 с.
22. Гаврилко В. М. и др. Методические указания по бурению скважин на воду установками с обратной промывкой. М., изд. ВОДГЕО, 1971, 72 с.
23. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений на скважины на приток воды. Рига, «Зинатне», 1969, 245 с.
24. Донской Г. В. Исследование пропускной способности водоприемной поверхности горизонтального трубчатого дренажа. — Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 22, Инженерная гидрогеология, 1969, с. 70—73.
25. Коль С. А. Определение скорости фильтрации подруслового потока. — Тр. Лен. гидрол. ин-та (ГГИ), вып. 8 (62), Гидрометеоиздат, 1948, с. 38—52.
26. Лерман С. Н., Володько И. Ф. Крепление артезианских скважин неметаллическими трубами. М., «Недра», 1968, 183 с.
27. Мухин Ю. В. Гидрогеологические наблюдения при колонковом бурении. М., Госгеолтехиздат, 1954, 59 с.
28. Огильви Н. А., Федорович Д. И. Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. М., «Недра», 1964, 85 с.
29. Реш Ю. А. Водомерный насадок дебитометра при откачке воды из буро-вой скважины эрлифтом. — «Гидротехника и мелиорация», 1963, № 6, 61 с.
30. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду. Под ред. В. В. Дубровского. М., «Недра», 1964, 507 с.
31. Справочник по специальным работам. Под ред. И. А. Ганичева. М., «Стройиздат», 1970, 200 с.
32. Сборник «Использование подземных вод». Изд. Московского Дома науч.-технич. пропаганды им. Дзержинского. М., 1969, 198 с.
33. Влемон Р. Contribution a l'interpretation des mesures de debit et de rabattement dans les nappes santeraines. Paris, 1966.
34. Koch A., Klotz I., Moser H. «Atomkernenergie», 1967, № 9—10.
35. Petersen I., Rohwer C., Albertson M. Proceedings ASCE, 79, 1954.
36. Pettengill Dall. Geol. Surv. Water Supply Paper, N 1882, 1966. Journ. of the Irrigation and drainage division. Proc. of the Amer. Soc. of Civil Engrs, N 1.
37. Soliman M. M. Journ. of the Irrigation and drainage division Proc. of the Amer. Soc. of Civil Engrs, 1965, N 1.

Глава II

1. Бабушкин В. Д. Определение водопроницаемости анизотропных пород. «Разведка и охрана недр», 1954, № 6, с. 50—53.
2. Баренблatt Г. И., Желтов Ю. П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. — «Докл. АН СССР», т. 132, 1960 г., № 3, с. 545—548.
3. Бегматов А. М. О понижении уровня грунтовых вод в покровной толще двухслойного пласта, создаваемом откачкой из нижележащего напорного горизонта. — «Механика жидкости и газа», 1967, № 6, с. 2—188.
4. Белякова В. К. Неустановившийся приток грунтовых вод к скважинам. — «Прикладная математика и механика», 1956, т. 20, вып. 1, с. 109—115.
5. Ботук Б. О. Гидравлика. М., «Высшая школа», 1962, 450 с.
6. Боревский Б. В. Учет естественных колебаний уровня подземных вод при обработке результатов опытных откачек. — «Разведка и охрана недр», 1969, № 10, с. 45—48.
7. Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Определение гидрогеологических параметров по данным откачек. М., «Недра», 1973, 320 с.

8. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968, 324 с.
9. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961, 199 с.
10. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1969, 366 с.
11. Веригин Н. П. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962, 180 с.
12. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. М., «Мир», 1969, 312 с.
13. Зеегофер Ю. О. Особенности определения гидрогеологических параметров в грунтовых горизонтах большой мощности. — «БМОИП, Геология», 1970, т. 45, № 3, с. 146—147.
14. Зеегофер Ю. О., Шестаков В. М. Методика обработки данных опытных откачек вблизи реки. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 9, с. 38—44.
15. Коляда М. Н. Характеристика коэффициентов упругоемкости водоносных горизонтов артезианских бассейнов. — Тем. сб. ВСЕГИНГЕО, вып. 17, 1969, с. 137—146.
16. Котов И. Г., Мироненко В. А., Сердюков Л. И. О влиянии жесткости слоев, перекрывающих водоносный горизонт, на закономерности упругого режима фильтрации. — «Прикладная механика и техническая физика», 1971, № 2, с. 172—176.
17. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967, 599 с.
18. Максимов В. А. О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде. — «Прикладная механика и техническая физика», 1962, № 3, с. 162—168.
19. Мальгинова Е. М. Неустановившаяся фильтрация грунтовых вод к скважинам. — Сб. Ростовского научного математического общества, 1967, с. 137—144.
20. Манукьян Д. А., Моркос Н. З. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойной среды по данным опытно-фильтрационных работ. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 10, с. 38—43.
21. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. Об учете сжимаемости глинистых пород при откачках из напорных водоносных горизонтов. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 11, с. 51—55.
22. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. Обработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 10, с. 34—38.
23. Моркос Н. З. Экспериментальное изучение динамики водоотдачи. — «Вестн. МГУ, серия геол.», 1970, № 3, с. 96—101.
24. Моркос Н. З., Шестаков В. М. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойного пласта по данным опытных откачек. — «Разведка и охрана недр», 1966, № 4, с. 48—52.
25. Насберг В. М. Обобщенная формула Дююи-Краснопольского в напорной совершенной скважине. — Тр. ТНИСГЭИ, т. 1, 1947, с. 12—33.
26. Пашковский И. С., Кухтина В. Л. Особенности определения гидрогеологических параметров в неоднородных водоносных горизонтах. — Тем. сб. ВСЕГИНГЕО, вып. 49, 1972, с. 102—113.
27. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1969, 185 с.
28. Хантуш М. С. Анализ данных опытных откачек из скважин в водоносных горизонтах с перетеканием. — В кн. «Вопросы гидрогеологических расчетов». М., «Мир», 1964, с. 27—42.
29. Хантуш М. С. Неустановившийся приток подземных вод к скважине, несовершенной по степени вскрытия. — В кн. «Вопросы гидрогеологических расчетов». М., «Мир», 1964, с. 61—84.
30. Хантуш М. С. Новое в теории перетекания. — В сб. «Вопросы гидрогеологических расчетов». М., «Мир», 1964, с. 43—60.

31. Чернов Б. С., Базлов М. И., Жуков А. К. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М., Гостоптехиздат, 1960, 319 с.
32. Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд-во МГУ, 1965, 232 с.
33. Шестаков В. М. Неустановившаяся фильтрация при откачке из скважины в неограниченном безнапорном потоке.— М., «Механика жидкости и газа», 1966, № 3, с. 145—147.
34. Шестаков В. М. Об определении гидрогеологических параметров пласта по данным опытных откачек при неустановившемся режиме.— «Разведка и охрана недр», 1962, № 12, с. 35—42.
35. Шестаков В. М. Построение свободной поверхности стационарного фильтрационного потока при откачке из совершенной скважины.— В сб. «Материалы по гидрогеологии». Вып. 415. Изд. Таш. ГУ, 1971, с. 39—45.
36. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. Изд-во МГУ, 1973, 327 с.
37. Шестаков В. М., Пашковский И. С. Анализ режима восстановления уровня в скважине.— Тем. сб. ВСЕГИНГЕО, вып. I, 1967, с. 28—35.
38. Язвин Л. С., Боревский Б. В. Опыт определения расчетных гидрогеологических параметров по данным групповых откачек.— «Разведка и охрана недр», 1963, № 4, с. 38—42.
39. Boulton N. S. «Pros. Inst. Civil Engrs.» vol. 26, Nov., 1963.
40. Jacob C. E. Trans. Amer. Geoph. Union, pt. 2, 1940.
41. Kruiseman J. P., De Ridder N. A. Analysis and evaluation of pumping test data. «Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement» Wageningen, 1970.
42. Papadopoulos I. S. Journ. of Geoph. Res. vol. 71, 1966, N 20.
43. Papadopoulos I. S. Cooper H. H. Water Resources Research, vol. 3, 1967, N 1.

Глава III

1. Авдонин Н. А., Буйкин А. А. Изменение температуры жидкости при ее движении по стволу скважины.— В сб. «Геотермические методы увеличения нефтеотдачи и геотермология нефтяных месторождений». Изд ВНИИОЭНГ, 1967, с. 18—24.
2. Аверьянов С. Ф. Зависимость водопроницаемости почво-грунтов от содержания в них воздуха.— Докл. АН СССР, т. 69, вып. 2, 1949, с. 141—144.
3. Алексеев В. С., Курманенко А. Д., Суханов В. Ф. О методике оценки зональной проницаемости водоносных пластов по данным расходометрии.— «Разведка и охрана недр», 1970, № 5, с. 46—49.
4. Алексеев В. С., Тесля А. Г. Временные методические указания по определению фильтрационных свойств пород при опережающем опробовании водоносных горизонтов. Изд. ВСЕГИНГЕО, 1967, 30 с.
5. Альпин Л. М. Палетки бокового каротажного зондирования (БКЗ). М., Гостоптехиздат, 1958, 70 с.
6. Аракелян Э. И. Эффективность исследования скважин испытателями пластов. ОНТИ ВИЭМС, 1968, 38 с.
7. Бадов В. В. Оценка водопроницаемости пород лабораторными и полевыми определениями.— «Вестн. МГУ, серия геол.», 1971, № 5, с. 119—122.
8. Башкатов Д. Н., Тесля А. Г. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин на воду. М., «Недра», 1970, 144 с.
9. Белкин О. К., Другин В. С., Личевский П. А., Панасенко Г. П., Прянишников В. Е. Опыт бурения гидрогеологических скважин. М., «Недра», 1970, 178 с.
10. Биндерман Н. Н. Определение водопроницаемости горных пород методом инфильтрации при неустановившемся движении.— «Разведка и охрана недр», 1957, № 10, с. 41—46.
11. Болдырев А. К. Опыт над фильтрацией в горных породах в связи с проектом водохранилища на р. Чу в Туркестане.— Мат-лы по общей и прикладной геологии, вып. 27, Л., 1926, 71 с.

12. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. Изд. 2, М., «Недра», 1969, 366 с.
13. Бродский П. А. и др. Каротажные опробователи пластов. М., «Недра», 1968, 73 с.
14. Васильевский С. С., Рязанцев Н. Ф. О применении серийно выпускаемых трубных испытательных инструментов. — «Нефтяное хозяйство», 1968, № 9, с. 32—36.
15. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962, 180 с.
16. Гаврилов Ю. А. и др. Внедрение метода послойного опробования водоносных горизонтов в процессе бурения. — В сб. «Геология и полезные ископаемые Туркмении», Ашхабад, 1968, с. 72—75.
17. Газян Г. С., Палий П. А. Современные конструкции испытателей пластов. — «Нефтяное хозяйство», 1961, № 12, с. 24—30.
18. Гершанович И. М. Расходометрия одиночных гидрогеологических скважин для определения гидрогеологических характеристик. — «Разведка и охрана недр», 1966, № 9, с. 53—55.
19. Гершанович И. М., Макаридин Н. А. Метод измерения объемной скорости движения жидкости на скважине для решения ряда вопросов гидрогеологии. — «Геофизическая разведка», — вып. 7, 1962, с. 102—111.
20. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации песков и супесей по данным налива в шурфы. — Тр. ВСЕГИНГЕО «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии». Госгеолтехиздат, 1953, с. 28—60.
21. Гиршкан С. А. Исследование динамики фильтрационного потока с помощью нейтронного индикатора влажности. — «Гидротехника и мелиорация», 1964, № 9, с. 26—34.
22. Горшков Г. В. Проникающие излучения радиоактивных источников. М., «Наука», 1967, 394 с.
23. Горелик А. М., Нестеренко И. П., Ряполова В. А. Об определении коэффициента фильтрации водоносных пород электрометрическими методами. — «Разведка и охрана недр», 1961, № 6, с. 33—37.
24. Грикевич Э. А., Алексеев В. С. Расчеты коэффициента фильтрации по данным опережающего опробования. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 7, с. 43—44.
25. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, «Зинатне», 1969, 245 с.
26. Гринbaum И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., «Недра», 1965, 188 с.
27. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. М., Гостоптехиздат, 1962, 547 с.
28. Денисов Н. Я. К методике определения водопроницаемости неводонесущих грунтов путем инфильтрации из шурфов. Ростов-на-Дону, Азово-Черноморское изд-во, 1936, 48 с.
29. Дерун А. М., Ровинский М. С. Скважинный расходомер и результаты его испытаний. — «Геофизическая аппаратура», вып. 25, 1965, с. 16—22.
30. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962, 490 с.
31. Колъ С. А., Риммар Г. М. Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод. — В сб. «Исследование подземных вод СССР», вып. 7. М., Гидрометеоиздат, 1936, с. 122—132.
32. Кошарский Б. Д. Справочник по приборам теплового контроля и автотрегулирования для электростанций и промышленных котельных. М.—Л., «Энергия», 1964, 511 с.
33. Лапшин П. С., Иванов В. П., Бабиков Р. Д., Сидоров В. А. Испытатели пластов для освоения скважин. — «Нефтяное хозяйство», 1967, № 12, с. 51—53.
34. Малофеев Г. Е. Сравнительная оценка формул для расчета нагревания пласта при нагнетании горячей жидкости. — «Нефтяное хозяйство», 1962, № 4, с. 48—52.

35. Маркелова М. П., Устрицев О. Г. Пример применения позонного опробования горных пород воздухом с целью изучения их трещиноватости.— «Инженерные изыскания в строительстве». Реферат. сб. 2(10), ПНИИС, 1971, с. 19—51.
36. Матвеев Б. К. Электрометрический способ определения направления и скорости движения подземных вод по одиночным скважинам.— «Вестн. МГУ, серия геол.», 1957, № 4, с. 167—177.
37. Миттельман Б. И. Справочник по гидравлическим расчетам в бурении. М., Гостоптехиздат, 1963, с. 253.
38. Молдавский О. П., Лещинский Э. Б., Эфрос В. Л. Опробование пластов ОПТС-8/19.— «Нефтяное хозяйство», 1969, № 9, с. 72—75.
39. Нечай А. М. Вопросы количественной оценки вторичной пористости трещиноватых коллекторов нефти и газа.— «Прикладная геофизика», вып. 38, 1964, с. 201—213.
40. Новак Т. Г. Построение водопоглощающей характеристики разреза скважин по температурным исследованиям.— «Вопросы промысловой геофизики». М., Гостоптехиздат, 1957, с. 444—462.
41. Ованесов Н. А., Лапшин П. С., Бабилян Г. А. Открытие залежей нефти и газа с помощью испытателей пластов.— «Нефтяное хозяйство», 1970, № 12, с. 29—31.
42. Огильви Н. А. Определение электрическим методом расхода готового потока.— «Разведка недр», 1937, № 2, с. 54—58.
43. Огильви Н. А., Федорович Д. И. Электрический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. М., «Недра», 1964, 40 с.
44. Петров А. И. Состояние и основные задачи по развитию техники для гидродинамических исследований скважин и пластов.— «Нефтяник», 1970, № 1, с. 4—7.
45. Петров А. И., Васильевский В. Н. Техника и приборы для измерения расхода в нефтяных скважинах. М., «Недра», 1967.
46. Подобин А. Г., Сергеев А. В. Методика и результаты применения испытателей пластов на разведочных площадках Томской области.— «Нефтяное хозяйство», 1969, № 12, с. 55—57.
47. Ромм Е. С. Некоторые особенности фильтрации в трещиноватых скальных породах.— Тр. координац. совещ. по гидротехнике, вып. 48, Л., «Энергия», 1970.
48. Рохлин Л. И. Анализ достоверности результатов применения опережающего опробования в рыхлых породах.— «Разведка и охрана недр», 1969, № 8, с. 46—53.
49. Рошаль А. А. Осесимметрические задачи микродисперсии в пористых средах.— «Прикладная механика и техническая физика», 1970, № 6, с. 72—78.
50. Рошаль А. А., Шестаков В. М. Методика полевых определений миграционных параметров пласта.— В сб. «Охрана подземных вод УССР от загрязнения и истощения». Мат-лы 1-го респуб. науч.-технич. совещ., вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1970, с. 75—79.
51. Рошаль А. А., Шестаков В. М. О миграции подземных вод в слоистых пластах.— Тем. сб. ВСЕГИНГЕО, вып. 14, 1969, с. 43—55.
52. Соколовский Э. В. Применение радиоактивных изотопов для контроля за разработкой нефтяных месторождений. М., «Недра», 1968, 180 с.
53. Справочник геофизика, т. II. М., Гостоптехиздат, 1961, 547 с.
54. Справочное руководство по применению ядерных методов в гидро-геологии и гидрологии. М., «Недра», 1971, 255 с.
55. Тесля А. Г., Блажков В. И. Методические указания по опережающему опробованию водоносных горизонтов. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1966, 40 с.
56. Тесля А. Г., Хлебодаров Н. И., Ясашин А. М. Рекомендации по применению испытателей пластов при гидрогеологических исследованиях. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1970, 53.
57. Требин Ф. А., Щербаков Г. В. Экспресс-метод исследования скважин по кривым восстановления давления.— «Нефтяное хозяйство», 1965, № 9, с. 28—31.

58. Устриев О. Г., Дзекцер Е. С. Опыт применения воздуха для определения фильтрационных свойств горных пород в основании гидротехнических сооружений. «Инженерные изыскания в строительстве». Реф. сб. 2(10), ПНИИИС, 1971.
59. Устриев О. Г. Фильтрационные опробования горных пород воздухом. — «Инженерные изыскания в строительстве». Реф. сб. 2(10) ПНИИИС, 1971, 21—27 с.
60. Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта. М., «Недра», 1, 1969, 238 с.
61. Черный В. Д. Скважинный термоэлектрический дебитомер. — «Прикладная геофизика», 1965, № 46, с. 189—205.
62. Чураев Н. В., Ильин Н. И. Радиондикаторные методы исследования движения подземных вод. М., «Атомиздат», 1967, 123 с.
63. Шестаков В. М. К теории фильтрации растворов в грунтах. — В сб. «Вопросы формирования химического состава подземных вод». МГУ, 1963, с. 192—213.
64. Шестаков В. М. Динамика подземных вод и моделирование гидро-геодинамических процессов. Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО при МГУ, 3-я сес.; цикл — «Динамика подземных вод». М., 1971. с. 3—55.
65. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. Изд-во МГУ, 1973, 327 с.
66. Ясашин А. М., Яковлев А. И. Испытание скважин. М., «Недра», 1967, 176 с.
67. Wogowczyk M. «Steir. Beitr. Hydrogeol.», 1966—1967, N 18—19.
68. Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies. Vienna, 1967.
69. Philip J. R. «Soil Science», vol. 84, 1957.
70. Philip J. R. «Water Resources Research», vol. 4, 1968, N 5.
71. Fok Yu-Si. Journal of Irrigation and Drainage Division. Proc. ASCE, vol. 96, 2, 1970.
72. Petersen I. S., Rohwer C., Albertson M. «Proc. Soc. of Civil Eng.» Dec., 1953.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица функций e^x , $K_0(x)$, $W(x)$

x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$W(x)$
0,01	1,010	4,721	4,768	4,037
0,02	1,020	4,028	4,109	3,354
0,03	1,030	3,623	3,733	2,959
0,04	1,040	3,336	3,472	2,681
0,05	1,051	3,114	3,273	2,467
0,06	1,061	2,932	3,114	2,295
0,07	1,072	2,779	2,981	2,150
0,08	1,083	2,647	2,868	2,026
0,09	1,094	2,531	2,769	1,918
0,10	1,105	2,427	2,682	1,822
0,20	1,221	1,752	2,140	1,222
0,30	1,349	1,372	1,852	0,905
0,40	1,491	1,114	1,662	0,702
0,50	1,643	0,924	1,524	0,559
0,60	1,822	0,777	1,416	0,454
0,70	2,013	0,660	1,330	0,373
0,80	2,225	0,565	1,258	0,310
0,90	2,459	0,486	1,197	0,260
1,00	2,718	0,421	1,144	0,219
1,20	3,320	0,318	1,057	0,158
1,4	4,055	0,243	0,988	0,116
1,6	4,953	0,188	0,930	0,086
1,8	6,049	0,145	0,882	0,064
2,0	7,389	0,113	0,841	0,048
3,0	20,085	0,034	0,697	0,013
4,0	54,598	0,011	0,609	0,003
5,0	148,413	0,0037	0,547	0,001

Таблица функции $erfc \lambda$

λ	$erfc(\lambda)$	λ	$erfc(\lambda)$	λ	$erfc(\lambda)$
0,00	1,00	0,38	0,591	0,76	0,282
0,02	0,977	0,40	0,572	0,78	0,270
0,04	0,555	0,42	0,552	0,80	0,258
0,06	0,933	0,44	0,534	0,82	0,246
0,08	0,910	0,46	0,515	0,84	0,235

λ	$\text{erfc}(\lambda)$	λ	$\text{erfc}(\lambda)$	λ	$\text{erfc}(\lambda)$
0,10	0,887	0,48	0,497	0,86	0,224
0,12	0,865	0,50	0,480	0,88	0,213
0,14	0,843	0,52	0,462	0,90	0,203
0,16	0,829	0,54	0,445	0,92	0,193
0,18	0,799	0,56	0,428	0,94	0,184
0,20	0,777	0,58	0,412	0,95	0,175
0,22	0,756	0,60	0,396	0,98	0,166
0,24	0,734	0,62	0,381	1,00	0,157
0,26	0,713	0,64	0,365	1,10	0,120
0,28	0,692	0,66	0,351	1,20	0,090
0,30	0,671	0,68	0,336	1,30	0,066
0,32	0,651	0,70	0,322	1,40	0,048
0,34	0,631	0,72	0,309	1,50	0,036
0,36	0,611	0,74	0,295	2,00	0,0048

Таблица функции $W(u, r/B)$

$u \backslash r/B$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
0	4,854	3,505	2,229	1,555	1,130	0,842	0,227
0,01	3,815	3,287	2,225	1,555	1,130	0,842	0,227
0,02	3,244	2,952	2,180	1,553	1,130	0,842	0,227
0,03	2,887	2,689	2,103	1,542	1,129	0,842	0,227
0,04	2,628	2,481	2,015	1,521	1,127	0,841	0,227
0,05	2,427	2,311	1,928	1,492	1,121	0,840	0,227
0,06	2,262	2,167	1,845	1,459	1,111	0,839	0,227
0,07	2,123	2,043	1,767	1,423	1,099	0,836	0,227
0,08	2,003	1,935	1,694	1,386	1,084	0,831	0,227
0,09	1,898	1,838	1,627	1,348	1,068	0,825	0,227
0,1	1,805	1,752	1,564	1,311	1,050	0,819	0,227
0,2	1,215	1,194	1,114	0,996	0,857	0,714	0,226
0,3	0,901	0,890	0,845	0,777	0,693	0,601	0,221
0,4	0,700	0,692	0,664	0,620	0,565	0,502	0,209
0,5	0,558	0,553	0,534	0,504	0,365	0,421	0,194
0,6	0,453	0,449	0,436	0,415	0,387	0,354	0,177
0,7	0,372	0,370	0,360	0,344	0,324	0,299	0,160
0,8	0,310	0,308	0,300	0,288	0,273	0,254	0,143
0,9	0,259	0,258	0,252	0,243	0,231	0,216	0,128
1,0	0,219	0,217	0,213	0,206	0,197	0,185	0,113
2,0	0,048	0,048	0,048	0,047	0,046	0,185	0,033
3,0	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,010
4,0	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
5,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Таблица функции $W^*(u, r/B)$

u	r/B	0,1	0,2	0,5	1	2	5
0,01		2,844	2,332	1,619	1,112	0,677	0,267
0,02		2,422	1,971	1,323	0,867	0,491	0,165
0,03		2,168	1,757	1,157	0,735	0,396	0,119
0,04		1,984	1,605	1,041	0,646	0,335	0,093
0,05		1,840	1,427	0,954	0,581	0,292	0,075
0,06		1,721	1,390	0,883	0,529	0,259	0,063
0,07		1,621	1,308	0,825	0,488	0,233	0,053
0,08		1,534	1,238	0,775	0,453	0,211	0,046
0,09		1,457	1,176	0,732	0,423	0,194	0,040
0,1		1,389	1,120	0,694	0,397	0,178	0,035
0,2		0,949	0,766	0,460	0,245	0,097	0,014
0,3		0,710	0,573	0,339	0,172	0,062	0,007
0,4		0,554	0,448	0,261	0,129	0,044	0,004
0,5		0,443	0,359	0,208	0,100	0,032	0,003
0,6		0,361	0,292	0,168	0,079	0,025	0,002
0,7		0,298	0,241	0,138	0,064	0,019	0,001
0,8		0,248	0,201	0,115	0,053	0,015	0,001
0,9		0,208	0,169	0,096	0,044	0,012	0,001

Таблица функции $W_B(u_B, r/B)$

$1/u_B$	$\lg 1/u_B$	W_B	$\lg W_B$	$1/u_B$	$\lg 1/u_B$	W_B	$\lg W_B$
		$r/B = 0,1$				$r/B = 0,2$	
4	0,602	4,86	0,686	0,4	-0,398	3,51	0,545
40	1,602	4,95	0,695	4	0,602	3,54	0,549
$4 \cdot 10^2$	2,602	5,64	0,751	20	1,301	3,69	0,567
$4 \cdot 10^3$	3,602	7,72	0,888	40	1,602	3,85	0,585
$4 \cdot 10^4$	4,602	10,01	1,000	150	2,176	4,55	0,658
				$4 \cdot 10^2$	2,602	5,42	0,734
		$r/B = 0,4$				$r/B = 0,6$	
0,1	-1,0	2,23	0,348	0,444	-0,353	1,586	0,200
1,0	0,0	2,26	0,354	2,22	0,346	1,707	0,232
5,0	0,699	2,40	0,380	4,44	0,647	1,844	0,266
10,0	1,00	2,55	0,406	16,70	1,223	2,448	0,389
37,5	1,574	3,20	0,505	44,40	1,647	3,255	0,512
100,0	2,0	4,05	0,607				
		$r/B = 0,8$				$r/B = 1$	
$2,5 \cdot 10^{-2}$	-1,602	1,133	0,054	0,04	-1,398	0,844	-0,074
0,25	-0,602	1,158	0,064	0,4	-0,398	0,901	-0,045
1,25	0,097	1,264	1,102	4,0	0,602	1,356	0,132
2,5	0,358	1,387	0,142	40	1,602	3,140	0,497
9,37	0,972	1,938	0,287				
25	1,398	2,704	0,432				
		$r/B = 2,0$				$r/B = 3,0$	
0,04	-1,398	0,239	-0,622	0,0178	-1,750	0,074	-1,129
0,02	-0,699	0,283	-0,548	0,0889	-1,051	0,093	-1,027
0,4	-0,398	0,337	-0,472	0,178	-0,750	0,118	-0,925
1,5	0,176	0,614	-0,212	0,667	-0,176	0,2618	-0,582
4,0	0,602	1,111	0,046	1,78	0,250	0,577	-0,239

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Технические средства для опытно-фильтрационных работ	6
§ 1. Выбор способа бурения и конструкции скважин	6
§ 2. Фильтры гидрогеологических скважин	12
§ 3. Насосное оборудование	22
§ 4. Приборы для опытно-фильтрационных работ	23
§ 5. Тампоны	40
Глава II. Методика определения фильтрационных параметров по данным опытных откачек и нагнетаний	43
§ 1. Основные закономерности фильтрации подземных вод и фильтрационные параметры	43
§ 2. Откачки в однородных изолированных напорных пластах	51
§ 3. Откачки в слоистых пластах	68
§ 4. Несовершенные скважины в напорных пластах	99
§ 5. Откачки в безнапорном потоке	114
§ 6. Откачки у прямолинейных границ пласта	126
Глава III. Специальные виды опытно-фильтрационных работ	139
§ 1. Опережающее опробование водоносных горизонтов	139
§ 2. Испытатели пластов	146
§ 3. Расходометрия скважин	154
§ 4. Определение миграционных параметров водоносных пластов	164
§ 5. Оценка водопроницаемости пород наливами в шурфы	183
Список литературы	193
Приложение	200

*Всеволод Михайлович Шестаков, Дмитрий
Николаевич Башкатов, Игорь Степанович
Пашковский, Владимир Сергеевич Алексеев,
Юрий Олегович Зеегофер, Анатолий Григо-
рьевич Тесля, Игорь Трифонович Гаврилов,
Александр Афанасьевич Ришаль, Валентин
Владимирович Бадов.*

Опытно-фильтрационные работы

*Редактор издательства А. И. Панова.
Переплет художника В. М. Лукьянова.
Технические редакторы В. В. Рожанова,
В. В. Соколова.
Корректор Н. Н. Власова.*

*Сдано в набор 7/VI 1973 г. Подписано в печать
2/XI 1973 г. Т-17467. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$. Бумага № 2.
Печ. л. 12,75. Уч.-изд. л. 13,57. Тираж 4000 экз.
Заказ № 3-1308/4257-2. Цена 1 р. 50 к.*

*Издательство «Недра», 103633. Москва, К-12.
Третьяковский проезд, 1/19.
Харьковская книжная фабрика «Коммунист» ре-
спубликанского производственного объединения
«Полиграфкнига» Госкомиздат УССР.
Харьков, ул. Энгельса, 11.*