

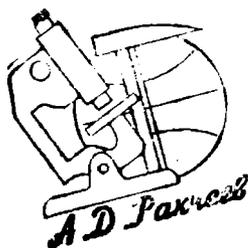
Е. Е. КЕРКИС

**МЕТОДЫ
ИЗУЧЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ
ГОРНЫХ
ПОРОД**

НЕДРА

Е. Е. КЕРКИС

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ
ГОРНЫХ
ПОРОД



ЛЕНИНГРАД
„НЕ ДРА“
ЛЕНИНГРАДСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ
1975

Керкис Е. Е. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Л., «Недра», 1975. 231 с.

В книге освещены теория и практика изучения фильтрационных свойств горных пород, проводимого для обоснования строительства и народнохозяйственных мероприятий, связанных с использованием подземных вод или борьбой с неблагоприятными последствиями их деятельности.

В книге подробно рассматриваются геологические и гидрогеологические закономерности и физико-геологические процессы, влияющие на фильтрационные свойства горных пород. Изучение этих закономерностей является основой для постановки опытных работ и других способов определения фильтрационных параметров. Приводятся сведения о новых методах изучения фильтрационных свойств.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся производственной и научно-исследовательской деятельностью в области гидрогеологии, а также может служить учебным пособием для студентов гидрогеологической специальности.

Табл. 18, ил. 32, прил. 3, список лит. 179 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Значение результатов изучения фильтрационных свойств горных пород при изысканиях для крупного строительства и других народнохозяйственных мероприятий общеизвестно.

От правильности и полноты характеристики фильтрационных свойств горных пород зависит обоснованность решения многих вопросов, как, например: выбор местоположения высоких плотин и других гидротехнических сооружений, а также разработка противофильтрационных мероприятий, обеспечивающих их устойчивость и нормальную работу; прогноз водопритоков в горные выработки; оценка запасов подземных вод для бытового и промышленного водоснабжения, а также промышленных и лечебных минеральных и термальных вод; разработка рациональных мелиоративных схем и т. д.

В настоящее время в связи с глобальной проблемой охраны окружающей среды от загрязнения промышленными отходами изучение фильтрационных свойств горных пород приобрело особенно большое значение для установления способов борьбы с загрязнением поверхностных и подземных вод путем закачки промышленных сточных вод в глубокие горизонты и других мероприятий.

К сожалению, изучение фильтрационных свойств горных пород не всегда производится удовлетворительно; объем и методы полевых лабораторных и камеральных работ иногда ущемляются формально, без надлежащего учета природных условий района исследований и закономерностей, характерных для изучаемых пород. Определение фильтрационных параметров и особенно установление их значений, служащих для гидрогеологических расчетов при проектировании различных объектов, часто производится недостаточно точно. Нередко при проведении исследований не соблюдается необходимая комплексность различных видов работ, не учитываются данные гидрогеологической съемки, геофизических работ и т. д.

Иногда опытные гидрогеологические исследования производятся устаревшими методами, что приводит к неоправданным

расходам и т. п. Были случаи грубых ошибок при установлении расчетных значений основных фильтрационных параметров, в результате чего пересоставлялись проекты и даже приходилось прекращать начатые строительные работы.

Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных работ, выполненных советскими и зарубежными учеными и специалистами (сведения о главнейших работах приведены в тексте книги), еще недостаточно применяются в широкой практике, а иногда используются неправильно.

В настоящей книге автор стремился дать гидрогеологам основу для проведения гидрогеологических работ на современном уровне, а также для исследований по проверке и усовершенствованию новых методов.

Книга построена следующим образом. В первой части подробно рассмотрены общие геологические и гидрогеологические закономерности, определяющие фильтрационные свойства различных горных пород. Во второй изложены теоретические основы методов определения фильтрационных параметров, рассмотрены основные дифференциальные уравнения фильтрации и их решения, служащие для расчетов параметров по данным опытных работ. В третьей кратко описаны методика и техника опытных гидрогеологических работ, приведены рекомендации для установления их необходимого объема, а также требования, предъявляемые к оборудованию опытных и наблюдательных скважин измерительной аппаратурой. В этой части книги рассмотрены также способы получения расчетных значений параметров, являющихся основой для гидрогеологических расчетов, выполняемых при проектировании различных объектов.

Автор не приводит подробного описания современного оборудования и аппаратуры, для получения необходимых сведений указывает соответствующую литературу. Методика лабораторных определений проницаемости и других параметров в книге не рассматривается, но приводятся сведения об их значении, а также системе и технике отбора представительных образцов.

Автор надеется, что книга будет полезной для инженеров-гидрогеологов и научных работников, а также студентов инженерно-гидрогеологической специальности.

Автор выражает благодарность профессору Ленинградского горного института В. М. Максимова за полученные от него ценные сведения и указания. При оформлении рукописи большая помощь автору была оказана научным сотрудником кафедры инженерной геологии Ленинградского университета М. Г. Брицовой.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
СТРОЕНИЕ,
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
УСЛОВИЯ
И ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ
ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА
ГОРНЫХ
ПОРОД

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД, ИХ ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

К основным фильтрационным свойствам горных пород относятся: проницаемость, определяющая способность породы пропускать сквозь себя воду; пористость, или пустотность, представляющая собой относительный объем пустот; фильтрационная анизотропия (или отсутствие ее), т. е. зависимость проницаемости от направления фильтрации, и некоторые другие характеристики пород, являющиеся следствием перечисленных. Во второй части книги рассматриваются также свойства, от которых зависит неустановившееся движение жидкости и вид закона фильтрации.

Фильтрационные свойства горных пород имеют количественное выражение и измеряются значениями фильтрационных параметров, называемых также гидрогеологическими.

Фильтрация воды, преимущественно рассматриваемая в настоящей книге, характеризуется водопроницаемостью. Последняя, однако, зависит от температуры и минерализации воды, влияющих на вязкость последней. Поэтому автор в дальнейшем изложении большей частью пользуется более общим термином — проницаемость.

Наиболее распространенной практической единицей измерения коэффициента проницаемости является 1 дарси, т. е. расход жидкости в кубических сантиметрах в секунду, имеющей вязкость 1 сантипуаз (спз) и фильтрующейся через поперечное сечение площадью 1 см² при градиенте давления 1 (кгс/см²)/см.

Наиболее удобной единицей измерения коэффициента водопроницаемости, называемой в гидрогеологической литературе часто коэффициентом фильтрации *, является метр в сутки; этот коэффициент измеряется также в сантиметрах в секунду.

Коэффициенты проницаемости в дарси и фильтрации в метрах в сутки численно близки друг к другу; при температуре пресной воды 26—27° С они равны. При температуре пресной воды 10° С умножение коэффициента проницаемости в дарси на 0,66 дает значения коэффициента фильтрации в метрах в сутки.

* Имеется в виду фильтрация пресной воды при температуре 5—10° С.

Для ориентировочной характеристики водопроницаемости трещиноватых пород на различной глубине при исследованиях для плотин широко применяется величина удельного водопоглощения (УВП). УВП представляет собой расход воды в литрах в минуту при опытном нагнетании на интервале скважины стандартной длины (около 5 м), приведенный к напору воды 1 м и длине интервала 1 м. Размерность УВП литр в минуту на квадратный метр обычно пишут литр в минуту.

Фильтрующая способность пластов, а для трещиноватых и карстованных пород — верхней проницаемой зоны, характеризуется проводимостью или при фильтрации воды — водопроводимостью, представляющими собой соответственно произведение коэффициента проницаемости или водопроницаемости на мощность пласта или проницаемой зоны.

Пустотность, или пористость, представляет собой, как было упомянуто, относительный объем всех пустот, имеющих в породе. Автор рекомендует применять термин «пустотность» для всех видов пустот независимо от их размеров и формы, а выражением пористость пользоваться только для относительно мелких пустот (не более 5 мм в поперечнике), имеющих близкие размеры в различных направлениях *. Такая терминология принята в данной книге.

Формирование фильтрационных свойств горных пород заключается в постепенном приобретении последними определенного количества пустот различных видов и размеров, а также соответствующей проницаемости и других свойств. Формирование фильтрационных свойств горных пород является результатом сложного комплекса физико-геологических процессов, вызывающих появление пустот и изменение как их размеров, так и формы.

Правильные представления о физико-геологических процессах, определяющих фильтрационные свойства горных пород и свойственные им закономерности, имеют большое значение для постановки детальных исследований и особенно опытных фильтрационных работ, так как обеспечивают соответствие последних природным условиям исследуемого района, а также облегчают интерпретацию получаемых данных.

§ 1.1. Проницаемость и пустотность

Проницаемость горных пород весьма разнообразна; она изменяется от значений, близких к нулю, до нескольких тысяч дарси.

Проницаемость пород зависит от их пустотности, но определяется не величиной последней, а суммарной проводимостью

* Ранее в трудах акад. Ф. П. Саваренского [134] для всех видов пустот применялось выражение «скважность», а для мелких пустот — «пористость». Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) предлагает пользоваться последним термином для всех видов пустот [139].

каналов или ходов, образуемых сообщающимися друг с другом пустотами *.

Хорошо известно, что трещиноватые породы с пустотностью порядка десятых долей процента могут иметь высокую проницаемость, а глины с пористостью 40—50% практически непроницаемы.

Вследствие различного происхождения, размеров и формы пустот в горных породах образуемая ими сеть проводящих каналов имеет сложные очертания, а каналы — переменное поперечное сечение.

Проводимость каналов, образуемых пустотами, пропорциональна второй или третьей степени их раскрытия и зависит главным образом от размеров поперечного сечения каналов в самых узких участках (см. § 4.2). Этим объясняется резко преобладающее значение для проницаемости пород крупных пустот. Для проводимости поровых и других каналов имеет также значение их очертание в продольном и поперечном направлениях и характер поверхности («скульптура») стенок. Одна и та же порода может заключать пустоты различного типа, происхождения и размера, а распределение пустот часто неравномерно, вследствие чего сложность связи между пустотностью и проницаемостью еще более возрастает.

Понятие «проницаемость горных пород» имеет смысл лишь при площади поперечного сечения фильтрационного потока, значительно большей, чем у проводящих каналов, а также линейных размерах этого сечения, в несколько раз превышающих расстояние между каналами. Так, например, для закарстованных пород с площадью поперечного сечения карстовых каналов 0,2—0,3 м² и расстоянием между ними 0,1—0,2 м первое условие требует, чтобы площадь поперечного сечения потока подземных вод была не менее 5—10 м², а второе, чтобы линейные размеры сечения были более 1—2 м. Между тем для мелкозернистых песков, поры которых имеют максимальные поперечные размеры порядка 0,1 мм, проницаемость может надежно определяться для площадей фильтрационного потока всего 2—3 см².

При большом поперечном сечении проводящих каналов и особенно при их неравномерном распределении, а также непостоянстве размеров иногда более правильно принимать в качестве исходных данных для фильтрационных расчетов проводимость отдельных каналов (карстовых, приуроченных к крупным разломам и т. п.), а не проницаемость пород всей изучаемой толщи или массива.

Пустоты в горных породах подразделяются на первичные, возникающие в период образования породы, и вторичные, появляющиеся в последующие геологические периоды.

* Проводимость поровых и других каналов, по которым движется вода, аналогична проводимости пластов.

Первичными пустотами являются: поры между частицами обломочных пород — межзерновые поры; щели литогенетических трещин и трещин напластования, первичных трещин отдельности, появляющихся при остывании магматических пород; каверны, образующиеся при доломитизации известняков в морской воде, и каверны в эффузивных породах, вызванные выделением газов.

Главнейшие вторичные пустоты представляют собой тектонические трещины, в частности соответствующие крупным разломам, карстовые полости и каналы, а также различные пустоты, образующиеся в сформировавшихся горных породах вследствие выветривания, разгрузки и других физико-геологических процессов, рассмотренных в § 1.3.

Очень часто вторичные пустоты возникают на месте первичных, причем проводимость последних может при этом увеличиться на несколько порядков. Так, например, карстовые каналы, по которым текут целые подземные реки, возникают нередко на месте весьма тонких литогенетических трещин.

По генезису и виду пустот горные породы подразделяются на следующие группы:

- 1) пористые обломочные, несцементированные (рыхлые и связные);
- 2) пористые обломочные сцементированные;
- 3) трещиноватые;
- 4) закарстованные и кавернозные.

Довольно широко распространены также породы с более чем одним видом пустот, например обломочные сцементированные и трещиноватые, трещиноватые и закарстованные и т. п.

Характеристика различных проницаемых пород с соответствующими примерами приведена в гл. 2.

§ 1.2. Физико-геологические процессы, влияющие на проницаемость и пустотность

Первичная пустотность горных пород и обусловленная ею проницаемость в последующие периоды обычно изменяются под действием различных физико-геологических процессов, вызванных эндогенными и экзогенными факторами, а иногда теми и другими совместно. Эти процессы, которые можно назвать последующими, приводят к увеличению проницаемости иногда от очень малых до предельно больших величин (порядка нескольких тысяч дарси) или уменьшению ее нередко почти до нуля. В отдельных случаях действие однотипных физико-геологических процессов на различных участках одной и той же толщи или массива имеет противоположный знак. Многие физико-геологические процессы вызывают также появление вторичных проводящих пустот.

Ниже рассмотрены главнейшие физико-геологические процессы начиная с эндогенных, влияющие на фильтрационные свойства горных пород после их образования.

I. Тектонические движения являются одной из главных причин возникновения многочисленных проводящих трещин в жестких породах и приобретения ими проницаемости.

Тектонические трещины можно подразделять на следующие четыре группы.

1. Трещины разлома с относительным смещением пересекаемых ими пород (по старой терминологии, предложенной А. Добре [147], — параклазы). Величина (амплитуда) смещения может быть у этих трещин от нескольких сантиметров до десятков и сотен метров, причем они распространяются на большую глубину, пересекая толщи разнообразных пород, а протяжение разломов может достигать десятков и сотен километров.

Основная трещина разлома — сместитель — всегда сопровождается ответвляющимися от нее более мелкими — «оперяющими», а также субпараллельными, имеющими ориентировку, близкую к основной. Совокупность всех этих трещин образует нарушенную сильнотрещиноватую и часто (у разломов со значительным смещением) дробленую зону, представленную нередко брекчиями трения и милонитами. Проницаемость* пород в нарушенной зоне обычно повышенная, но иногда основная трещина заполнена слабопроницаемым мелкообломочным материалом (глинистой брекчией трения, глиной трения и т. п.) или жильными минералами, почему в нарушенной зоне максимальную проводимость имеет не сместитель, а оперяющие и субпараллельные ему трещины.

Проводимость тектонических трещин разлома обычно зависит от их кинематического типа. Наибольшую проводимость имеют трещины отрыва и сброса, образующиеся вследствие растягивающих и скалывающих усилий. В частности, оперяющие трещины часто являются трещинами отрыва; они имеют значительное, но непостоянное раскрытие, бывают зияющими или заполненными грубыми обломками, вследствие чего имеют значительную проводимость. Наименьшую проводимость имеют трещины взброса и надвига, так как стенки их притерты друг к другу, а заполнитель представляет собой мелкодробленый слабопроницаемый материал, часто глину трения. Трещины сдвига и сбросо-сдвига занимают промежуточное положение.

Трещины сброса и сбросо-сдвига характеризуются преимущественно прямой зависимостью проводимости от амплитуды смещения, это наблюдается нередко и для трещин сдвига, но не для взбросов и надвигов. Проводимость трещин отрыва часто бывает значительной, несмотря на отсутствие заметного смещения.

Иногда зависимость проводимости трещин от амплитуды смещения наблюдается у одной или двух систем их и не выражена у других.

* Здесь и ниже имеется в виду проницаемость пород и проводимость трещин на глубине, где влияние экзогенных физико-геологических процессов проявляется слабо.

2. Мелкие, но многочисленные трещины без заметного смещения или с незначительным смещением, возникновение которых связано со складкообразованием (по терминологии А. Добре [147], диаклазы), называемые институтом Гидропроект соскладчатыми трещинами, развиваются обычно по первичным трещинам отдельности. Эти трещины бывают двух видов: нормальные к напластованию и параллельные ему. Трещины первого вида имеют довольно большое раскрытие и повышенную проводимость в сводах антиклиналей. Трещины второго вида развиваются вследствие сдвигов по плоскостям напластования. Их проводимость редко бывает значительной из-за малого раскрытия, притертости стенок и заполнения на расширенных участках малопроницаемым дисперсным материалом.

Трещины данной группы обычно имеют небольшое протяжение и не распространяются за пределы отдельных пластов или массивов магматических пород.

3. Региональные тектонические трещины платформенных областей подразделяются на продольные и поперечные трещины отрыва и диагональные трещины скалывания. Они могут иметь довольно высокую проводимость, особенно в карбонатных породах, но расположены на значительном расстоянии друг от друга.

4. Трещины кливажа имеют весьма малую, нередко близкую к нулю проводимость.

Проводимость тектонических трещин зависит в большинстве случаев от возраста горообразовательных движений, вызвавших их появление. Наибольшей проводимостью характеризуются трещины, образовавшиеся в период альпийского горообразования, особенно во время его последних фаз. Трещины, возникшие в более древние периоды тектонических движений, имеют обычно низкую проводимость, будучи «залеченными», т. е. заполненными жильными минералами и другим материалом. Однако нередко наблюдается возобновление проводимости этих трещин при новых тектонических движениях, чаще всего при дифференциальных движениях участков земной коры («глыб»), разделенных крупными разломами.

Вещественный состав горных пород, пересеченных трещинами, имеет большое значение для их проводимости. Более высокую проводимость имеют трещины в твердых непластичных породах, при механическом разрушении которых не образуется значительного количества дисперсного материала с низкой проницаемостью. В пластичных породах (глинистых сланцах и глинах, галоидных солях, гипсе, мергелях и т. д.) трещины имеют невысокую проводимость. Это объясняется смыканием и даже исчезновением трещин в этих породах на сравнительно небольшой глубине вследствие геостатического, а в районах интенсивной складчатости также тектонического давления. На глубинах порядка нескольких сотен метров даже карбонатные породы становятся пластичными и малопроницаемыми.

Проводимость тектонических трещин, пересекающих породы, заключающие глинистые и мергелистые слои и включения, также сильно снижается (иногда почти до нуля) вследствие заполнения трещин непроницаемым материалом, образующимся из этих слоев.

В областях молодых тектонических движений трещины разлома могут заполняться минеральными новообразованиями лишь частично и сохранять значительную проводимость. С такими трещинами разлома бывают связаны минеральные и термальные источники.

Проводимость тектонических трещин по мере приближения к поверхности, как правило, увеличивается вследствие экзогенных процессов.

II. Изменение напряженного состояния горных пород и гравитационные перемещения оползневых и обвальных массивов являются процессами, обусловленными как движением земной коры (преимущественно вертикальными), так и денудацией и эрозией, т. е. совместно эндогенными и экзогенными факторами. Влияние этих процессов на фильтрационные свойства горных пород значительно и проявляется преимущественно в закономерных пространственных изменениях проницаемости трещиноватых пород.

Своеобразное проявление изменения напряженного состояния горных пород заключается в образовании трещин донной и бортовой разгрузки (отпора).

Трещины донной разгрузки образуются в основании крутых склонов глубоких долин с плоским дном вследствие увеличения раскрытия горизонтальных и пологопадающих трещин отдельности и тектонических трещин. Главной причиной возникновения трещин донной разгрузки является смена усилий, направленных в бортах ущелья в сторону реки, силами, направленными кверху, вызывающими небольшие смещения блоков породы в этом направлении. Трещины донной разгрузки имеют обычно очень высокую проводимость, и удельное водопоглощение при опытных нагнетаниях на интервалах пересечения подобных трещин достигало иногда нескольких сотен литров в минуту (на участке Колымской ГЭС даже более тысячи). Трещины донной разгрузки с весьма высокой проводимостью были обнаружены также при исследованиях для ряда других высоких плотин на скальном основании (см. гл. 2).

Трещины бортовой разгрузки * образуются в отвесных и очень крутых бортах ущелий вследствие разгрузки и часто также гравитационных перемещений скальных массивов. Направленное в сторону реки главное напряжение вызывает в данном случае увеличение раскрытия вертикальных или крутопадающих трещин

* Ранее, в 1930 г., Д. В. Дробышевым они назывались «трещинами скола берега».

с простиранием, близким к направлению течения реки. Раскрытие трещин бортовой разгрузки может достигать 0,5 м (иногда и более), а проводимость их столь велика, что не поддается учету даже при частичном заполнении грубообломочным материалом, обваливающимся со стенок и с поверхности. Столь большое раскрытие объясняется в большинстве случаев скользянием сколотых массивов в сторону реки по глинистым или мергелистым прослоям или трещинам с глинистым заполнением, что является начальной стадией обвалов или оползней-обвалов (сколотые массивы нередко частично разрушаются).

Трещины бортовой разгрузки очень хорошо выражены в толщах карбонатных пород. Автором при консультации Д. В. Дробышева эти трещины были в 1931—1932 гг. изучены на участке строящейся в настоящее время высотной Чиркейской плотины. Д. В. Дробышев предполагал, что одной из главных причин их образования являются сейсмические толчки*.

Раскрытие трещин бортовой разгрузки в Чиркейском ущелье, по последним данным института Ленгидропроект, основанным на документации многочисленных горных выработок, достигает 70 см, причем они сгруппированы в пачки мощностью до 15 м, заключающие до 10—12 трещин.

Проводимость трещин бортовой разгрузки в Чиркейском ущелье чрезвычайно велика. Косвенным признаком этого являются результаты исследования скважины глубиной 233 м, пробуренной на левом борту ущелья параллельно главной трещине бортовой разгрузки на расстоянии от нее около 10 м в несколотом массиве. При наливе в эту скважину воды с расходом 12 л/сек уровень повысился на 175 м над статическим, но довести его до устья не удалось. При поинтервальных опытах удельное водопоглощение было очень высоким; на нескольких интервалах при расходе воды до 5 л/сек давления создать не удалось.

Схематический фильтрационный профиль левого берега р. Сулак на участке Чиркейской плотины с показателем трещин бортовой разгрузки изображен на рис. 1.1, а сами трещины — на рис. 1.2.

III. Процессы выветривания сильно влияют на фильтрационные свойства горных пород, так как вызывают увеличение площади поперечного сечения проводящих каналов, изменение количества и состава их заполнителя, а в поверхностной зоне также появление новых трещин и пустот. Больше всего подвержены влиянию выветривания на проницаемость трещиноватые породы.

Следствием выветривания является большей частью увеличение проницаемости пород, иногда очень значительное. Однако

* Однако при землетрясении в Дагестане 14 мая 1972 г., сила которого на участке строительства Чиркейской плотины была 8 баллов при максимальной энергии 10^{16} дж, не наблюдалось существенных нарушений бортов ущелья. Строительство арочной Чиркейской плотины высотой 236 м заканчивается.

при наличии в зоне выветривания большого количества мелко-дисперсного материала последний заполняет пустоты и проницаемость пород вследствие выветривания не повышается, а может даже понизиться.

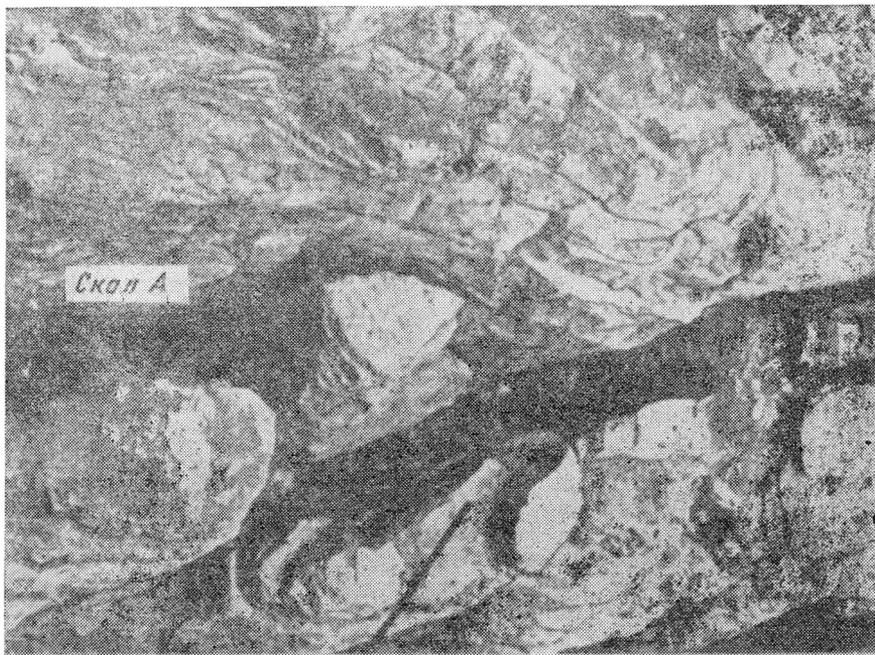


Рис. 1.2.
Трещины бортового отпора (скол А) на левом берегу р. Сулак, на высоте 60 м над рекой. Фото Б. Л. Вильнер, 1973 г.
Трещины расчищены при подготовке склона к строительству Чиркейской плотины.

При физическом выветривании проницаемость пород обычно повышается и может достигнуть предельно высокой величины порядка тысяч дарси при дезинтеграции скальных пород.

Зона физического выветривания в умеренном климате имеет мощность несколько метров; на участках разломов и интенсивной

Рис. 1.1.
Поперечный геолого-литологический профиль левого берега Чиркейского ущелья на р. Сулак по оси высотной плотины [60].

1 — аллювий р. Сулак; 2 — осыпи и делювий; 3 — известняки верхнего мела плотные, плитчатые и слоистые с тонкими прослоями мергеля; 4 — мергелистые известняки; 5 — чередующиеся слои пестрых мергелистых известняков и плотных серых плитчатых известняков; 6 — тектонические трещины; 7 — трещины бортового отпора (трещины скола берега) и глинистые прослои в основании сколотых массивов; 8 — граница верхней зоны пород, разрушенных выветриванием; 9 — водопоглощение при опытных нагнетаниях; 10 — интервалы скважин с весьма высоким водопоглощением (создать давление у устья скважины при нагнетании не удалось).

трещиноватости она может увеличиться до 10—15 м; в холмистых и горных районах зависит от экспозиции склонов.

Проницаемость пород в зоне физического выветривания обычно очень непостоянна, особенно при пересеченном рельефе и дислоцированных породах. Кроме того, проницаемость пород в этой зоне может изменяться также во времени вследствие размыва и перераспределения материала, заполняющего трещины и другие пустоты.

Зона физического выветривания совпадает с поверхностным слоем разрушенных пород, удаляемым при возведении крупных гидротехнических и других ответственных сооружений вследствие своей неоднородности, фильтрационной неустойчивости пород и т. п. [54].

Химическое выветривание, как известно, представляет собой разрушение пород при действии на них влажного воздуха и воды, содержащей в растворе углекислоту, органические и другие кислоты, а также кислород. Химическое выветривание нередко сопровождается биохимическими процессами.

Наиболее интенсивно химическое выветривание протекает в зоне аэрации, особенно в ее верхней части, но оно распространяется и вглубь, в зону интенсивного водообмена, где обычно постепенно затухает.

В областях с теплым и влажным климатом химическое выветривание происходит очень интенсивно, преобладая над физическим в самой поверхностной зоне, чему способствует густая сеть трещин, вызывающая увеличение поверхности, подвергающейся действию воздуха и воды.

Общая мощность зоны выветривания (коры выветривания) может достигнуть нескольких десятков метров. По Б. Б. Полюнову [35], максимальная мощность коры выветривания около 50 м, но, по-видимому, иногда она может быть и большей.

Химическое выветривание при малом количестве образующегося тонкого материала, так же как и физическое, вызывает увеличение проницаемости пород, иногда довольно существенное. То же самое происходит, если тонкий материал выносится подземными водами. Так, например, в зоне аэрации при наличии незаполненных трещин просачивающиеся по ним (инфлюационные) воды переносят тонкий материал вглубь. Если же тонкий материал остается на месте своего образования, то проницаемость пород уменьшается иногда до близких к нулю значений.

У трещиноватых пород наиболее мощная часть коры выветривания, распространяющаяся вглубь от основания слоя пород, разрушенных физическим выветриванием, выделяется институтом Гидропроект как «зона пород средней сохранности», представляющая собой обычно хорошее основание для плотин и других гидротехнических сооружений, но обладающая разнообразными фильтрационными свойствами.

Глубже коры выветривания залегают практически непроницаемые породы, критерием для выделения которых при гидротех-

ническом строительстве является удельное водопоглощение, меньшее 0,01—0,05 л/(мин·м²)*, точнее устанавливаемое в зависимости от подпора, типа и конструкции плотины. Соответствующая указанному удельному водопоглощению проницаемость приблизительно равна 0,012—0,06 дарси.

IV. Растворение и выщелачивание** и противоположный процесс выпадения из подземных вод нерастворимых в них соединений для многих видов горных пород являются главной причиной изменения их первичной пустотности и проницаемости. Породы, увеличивающие свою проницаемость при фильтрации через них воды, образованы полностью или в значительной своей части минералами, в большей или меньшей степени растворимыми и подверженными выщелачиванию или химическому действию подземных вод. Ниже приведены краткие сведения о растворимости наиболее распространенных из числа указанных минералов.

1. Наибольшую растворимость имеют галоидные соли. Так, галит NaCl имеет растворимость 320 г/л при температуре 10° С; влияние температуры и содержания в воде других электролитов на растворимость галита незначительно [53].

2. Гипс и ангидрит растворимы в воде значительно меньше, чем галоидные соли. Растворимость сернокислого кальция CaSO₄ в пресной воде при 10° С — 1,93, при 25° С — 2,1 г/л.

Растворимость CaSO₄ при концентрации NaCl в воде от 130 до 180 г/л увеличивается более чем в 3 раза; дальнейшее увеличение концентрации NaCl вызывает некоторое уменьшение растворимости CaSO₄.

3. Растворимость карбонатов кальция и магния в дистиллированной воде, не содержащей растворенной углекислоты, соответственно равна 15 и 160—220 мг/л. Однако растворимость доломита еще несколько меньше, чем кальцита, что существенно вследствие широкого распространения доломитов и доломитизированных известняков.

Наличие в воде свободной углекислоты, а также органических и других кислот сильно увеличивает растворимость карбонатов кальция и особенно магния.

При обычной для рек, озер и других водоемов, а также для грунтовых вод концентрации свободной углекислоты ***

* Эти значения удельного водопоглощения установлены мировой практикой строительства плотин, но, по мнению автора, иногда имеют излишний «запас».

** В данной книге понятие «растворение» относится условно к минералам и горным породам, нерастворимый остаток которых менее 40—50%; при большем содержании нерастворимых примесей применяется термин «выщелачивание».

*** Растворение карбонатов вызывается только частью свободной углекислоты, т. е. агрессивной углекислотой, определяемой расчетом или действием воды на измельченный мрамор. Последнее дает также содержание других кислот, эквивалентное количеству углекислоты [130].

до 60—100 мг/л растворимость CaCO_3 [равна 300—360 мг/л, а MgCO_3 — нескольким граммам на литр (при температуре 17° С).

Содержание других электролитов, не превышающее обычной их концентрации в природных пресных водах, слабо влияет на растворимость карбонатов кальция и магния; только аммоний вызывает значительное увеличение растворимости карбоната магния и в меньшей степени кальция.

Растворимость карбонатов кальция и магния в различных условиях подробно рассмотрена в работах П. Н. Бутырина [26], Ф. Ф. Лаптева, [88], в упомянутой монографии Д. С. Соколова [140] и во многих других работах.

4. Цеолиты слабо растворимы в воде, легко вступают в обменные реакции и при растворении в большинстве случаев разлагаются с выделением водной кремнекислоты. Растворимость цеолитов быстро возрастает при повышении температуры. Без разложения растворяется апофиллит $\text{Ca}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2[\text{K F}]8\text{H}_2\text{O}$, широко распространенный в виде жил и включений в неовулканических породах; растворимость его в холодной воде около 35 мг/л; при повышении температуры растворимость апофиллита быстро возрастает.

Растворимость и реакционная способность цеолитов имеет значение для проницаемости трещиноватых и кавернозных вулканических пород.

5. Полевые шпаты и другие алюмосиликаты медленно выщелачиваются и разлагаются водой, содержащей свободную углекислоту и другие кислоты, причем в виде нерастворимого осадка остаются глинистые минералы (каолинит, иллит, монтмориллонит и др.), а также водная кремнекислота. Хорошо известна и приводится во всех руководствах по гидрогеологии реакция разложения ортоклаза водой, содержащей углекислоту. Особенно энергично действуют на алюмосиликаты кислые термальные воды.

Скорость растворения и выщелачивания горных пород зависит от многих факторов; главные из них: растворимость породообразующих минералов, температура, интенсивность водообмена и вид движения воды (ламинарное или турбулентное), ориентировка и характер поверхности, омываемой водой. Гидростатическое давление на глубинах до нескольких километров мало влияет на скорость растворения.

Растворение и выщелачивание может представлять собой обратимый процесс разрушения кристаллической решетки, восстанавливающейся при изменении физико-химических условий, что имеет место, например, для галоидных солей и гипса, но также широко распространены процессы, являющиеся необратимыми химическими реакциями, примером которых может служить разложение полевых шпатов и других алюмосиликатов. Эти процессы протекают более медленно и обычно в меньшей степени влияют на пустотность и проницаемость горных пород.

Растворение карбонатов кальция магния водой, содержащей свободную углекислоту, при невозможности улетучивания последней также является обратимым процессом.

Поскольку скорость растворения и выщелачивания горных пород связана прямой зависимостью с интенсивностью водообмена, эти процессы затухают при увеличении глубины и могут даже смениться выпадением из воды различных соединений, что ведет к уменьшению проницаемости пород. В результате возникают закономерные пространственные изменения фильтрационных свойств, зависящие от гидродинамических условий и соответствующей вертикальной зональности.

Растворение и выщелачивание сильнее всего влияют на проницаемость трещиноватых пород; поэтому представляет интерес зависимость* для скорости растворения породы при движении воды по трещине, имеющая вид

$$r_x = \frac{\dot{z}}{\delta} (C_n - C_0) e^{-\alpha}, \quad (1.1)$$

где r_x — скорость растворения — масса вещества, переходящего в раствор за единицу времени с единицы площади; D — коэффициент диффузии; δ — толщина диффузионного слоя молекулярно-связанной воды; C_n — концентрация компонента, переходящего в раствор при полном насыщении; C_0 — то же в воде, поступающей в трещину; $\alpha = \frac{2D}{\delta bu} x$ или $\alpha = \frac{2D}{\delta b} t$; x — расстояние от места поступления воды в трещину (рис. 1.3); t — время прохождения водой расстояния x ; u — скорость движения воды; b — первоначальное раскрытие трещины (u и b приняты постоянными).

Зависимость (1.1) является следствием основной формулы кинетики растворения

$$\frac{dM}{dt} = C_n \frac{DF}{\delta} \left(\frac{C_n - C}{C_n} \right)^n, \quad (1.2)$$

где M — масса вещества, переходящего в раствор за время t с площади F ; C — концентрация этого вещества на внешней границе диффузионного слоя.

При выводе формулы (1.1) принято $n = 1$, что соответствует наиболее простому случаю; вообще показатель степени n может быть большим единицы.

Величина D/δ представляет собой коэффициент скорости растворения (называемый неправильно в некоторых работах константой скорости растворения). Эта величина не вполне постоянна, зависит от характера и ориентировки поверхности раздела, а также в небольшой степени от скорости движения воды, что не имеет принципиального значения для дальнейших выводов.

* Зависимость (1.1) в несколько ином виде, а также значения r_x , показанные на рис. 1.3, получены автором в 1932—1933 гг. [60].

Аналогичные зависимости описывают также растворение горных пород при движении воды через трубообразные каналы (например, карстовые), при фильтрации через пористые породы, состоящие из растворимых минералов или заключающих их в рассеянном виде, а также процессы выщелачивания.

Существенно, что согласно указанным зависимостям скорость растворения и агрессивность воды при обогащении ее раство-

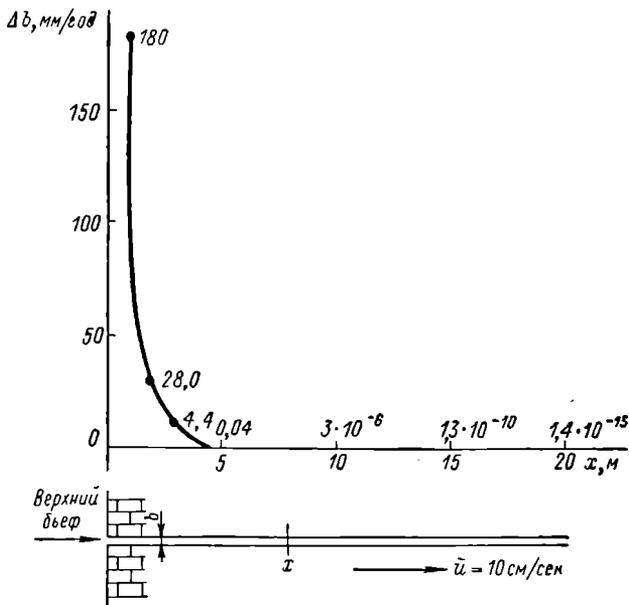


Рис. 1.3.

Расширение трещины в известняках верхнего мела вследствие их растворения для условий участка строительства Чиркейской ГЭС.

Приближенный расчет произведен по формуле (1.1) при $D/\delta = 3,7 \cdot 10^{-5}$ см/сек; $b=0,1$ см; $C_n - C_0=100$ мг/л; $u=10$ см/сек.

Ющими компонентами уменьшаются очень быстро [согласно формулам (1.1) и (1.2) по экспоненциальному закону]. Еще быстрее уменьшается проводимость трещин или ходов, по которым движется вода, что соответствует гидравлическим закономерностям (см. § 4.2).

Изложенное объясняет быстрое увеличение проницаемости пород, подверженных растворяющему действию воды при приближении к дневной поверхности; однако эта закономерность обусловлена и другими экзогенными процессами, рассмотренными выше.

Быстрое уменьшение агрессивности воды при фильтрации ее через растворимые породы является положительным фактором для строительства высоких плотин на незакарстованных карбо-

натных породах. Так, автором еще в 1932 г. при предварительных исследованиях для высотной Чиркейской плотины на р. Сулак было доказано на основании лабораторных опытов растворения известняков, что существенное увеличение проводимости трещин должно наблюдаться лишь в зоне протяжением 5—10 м со стороны верхнего бьефа [60]. Обычные противофильтрационные мероприятия, несмотря на подпор Чиркейской плотины около 200 м, будут достаточными для устранения опасных последствий растворения. Результаты выполненных автором расчетов после некоторого уточнения изображены на рис. 1.3.

Зависимости (1.1) и (1.2) получены для условия, при котором вода, растворяющая или выщелачивающая горные породы, меняет свой состав только за счет обогащения компонентами, переходящими в раствор, и поэтому постепенно теряет свою агрессивность. В природной обстановке, однако, агрессивное действие воды может возобновляться на пути ее движения вследствие смешения с водами иного химического состава, химических реакций, биохимических процессов и изменения температуры. Так, например, приток воды, содержащей растворенную углекислоту или органические кислоты (например, просачивающейся почвенной или болотной воды), а также поглощение углекислоты из воздуха делают воду вновь агрессивной по отношению к карбонатным породам и способной действовать на алюмосиликаты.

Приток вод, содержащих растворенный кислород, при действии на серный колчедан (пирит, марказит) и другие сульфиды приводит к появлению в воде свободной серной кислоты (точнее, ионов H^+ и SO_4^{2-}), весьма агрессивно действующей на горные породы. При окислении водами, содержащими кислород, органические соединения часто при участии микроорганизмов образуют органические кислоты и свободную углекислоту.

Из числа биохимических процессов имеет значение деятельность сульфатредуцирующих бактерий, вызывающая восстановление сульфатов углеводородами с образованием углекислоты и сероводорода, что возможно на глубинах свыше 1000 м и при температуре воды до $50^\circ C$ [42].

Вследствие восстановления агрессивности воды на пути ее движения уменьшение проницаемости карбонатных пород с глубиной и на протяжении пути от области питания к области разгрузки часто происходит значительно медленней, чем это должно быть согласно приведенным теоретическим зависимостям, не учитывающим ряда природных факторов.

Одним из наиболее существенных для фильтрационных свойств горных пород результатов их растворения является карст, которому посвящена весьма обширная литература. Основные закономерности проницаемости закарстованных пород рассмотрены ниже (см. § 2.5).

Интенсивность описываемых процессов неодинакова в различных зонах земной коры. В зоне аэрации преобладает растворение

и выщелачивание. Однако локально происходит частичное заполнение пустот кальцитом, водной окисью железа, цеолитами, водной кремнекислотой и другими слаборастворимыми минералами, а также глинистым материалом, образующимся при разложении алюмосиликатов или другим путем.

В северных областях избыточного увлажнения пески в поверхностной зоне нередко цементируются водной окисью железа и образуют слабопроницаемый слой ортштейна. В засушливых районах песчано-галечные отложения древних речных террас местами цементируются карбонатами или гипсом и образуют слой непрочного малопроницаемого конгломерата.

В зоне интенсивного водообмена процессы растворения и выщелачивания также преобладают, но с глубиной ослабевают и местами сменяются заполнением пустот минеральными новообразованиями. В результате проницаемость пород уменьшается иногда почти до нуля.

В зонах замедленного и крайне замедленного водообмена процессы цементации пород и заполнения пустот различными минералами резко преобладают, вследствие чего породы становятся весьма слабопроницаемыми или практически непроницаемыми.

Исключением являются области новейших тектонических движений и современного магматизма, где могут возникать локальные зоны, в пределах которых процессы растворения и выщелачивания протекают весьма интенсивно. Это происходит в местах прохождения глубинных разломов, образовавшихся или «оживившихся» в недавнее геологическое время, а также вблизи еще не остывших магматических очагов. Флюиды и растворы, поступающие здесь из глубоких зон земной коры или магмы, весьма агрессивно действуют на горные породы. (Флюиды представляют собой многокомпонентные легкоподвижные и весьма реакционно-способные растворы, агрегатное состояние которых точно неизвестно. В нефтяной геологии, гидрогеологии и гидродинамике флюидами называют воду, нефть и газ.)

При высокой температуре и давлении на горные породы активно действуют также водяной пар и кремнекислота. Растворению подвергаются карбонаты, но так же быстро разрушаются и выщелачиваются многие силикаты. В результате этих процессов проницаемость пород сильно возрастает, но отличается крайним непостоянством, причем часто наблюдается ее уменьшение в направлении кверху, противоположное обычной закономерности.

V. Суффозия и кольматация являются взаимно противоположными процессами, но нередко сопутствующими друг другу на различных участках одного и того же горизонта, толщи или массива.

В природных условиях суффозия довольно широко распространена в зоне аэрации, а в насыщенных водой породах наблюдается лишь на небольших участках, где скорость движения подземных вод выше вымывающей скорости.

Проницаемость горных пород вследствие суффозии возрастает иногда очень сильно.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные случаи суффозии.

1. Размыв и вынос песчаного или супесчаного заполнителя галечников (аллювиальных и пролювиальных) в русле горных рек и временных потоков происходит на участках с большой скоростью течения. Промытые галечники приобретают высокую проницаемость, иногда превышающую тысячу дарси, но мощность промытого слоя обычно не превышает нескольких метров.

На таких же участках с выходами в русле скальных трещиноватых пород может происходить вымыв суффозионно неустойчивого заполнителя трещин, что также приводит к значительному увеличению проницаемости этих пород в поверхностной зоне.

На участках горных рек с более медленным течением заполнитель галечников не вымывается. Здесь распространены галечники с песчаным заполнителем и песчано-галечные отложения, которые при значительном количестве взвешенного материала, переносимого рекой, местами могут кольяматироваться, вследствие чего их проницаемость в поверхностном слое понижается до 10—20, а иногда всего до нескольких дарси.

Кольяматироваться могут в подобных условиях и трещиноватые породы.

2. В зоне аэрации суффозия происходит в песчано-глинистых отложениях, подстилаемых породами с высокой проницаемостью: галечниками, закарстованными известняками, сильно трещиноватыми скальными породами и т. п. При этом часто возникают суффозионные и провальные формы микрорельефа: воронки, «колодцы» с отвесными стенками и замкнутые впадины.

Колодцы суффозионного происхождения диаметром около 1 м наблюдались автором в слое лёссов мощностью 2—3 м с поверхностью, почти лишенной почвенного покрова, налегающем на галечники древней террасы, находящейся на высоте нескольких десятков метров над уровнем р. Вахша в нескольких километрах выше г. Курган-Тюбе (Южный Таджикистан). Колодцы доходили до кровли галечников (рис. 1.4).

Суффозионное происхождение имеют, по-видимому, также степные блюдца, распространенные в юнжорусских степях и описанные в работах К. И. Лисицына [92].

Воронки в глинистых породах, покрывающих закарстованные известняки при «покрытом карсте», также имеют суффозионное происхождение [140]. Такие воронки наблюдаются на силурійском плато в Ленинградской области, в Подмосковном бурюгольном бассейне и во многих других районах (рис. 1.5).

Вследствие очень высокой проводимости суффозионных ходов в покровных песчано-глинистых породах проницаемость их в вертикальном направлении становится очень высокой (имеется в виду средняя проницаемость для больших площадей).

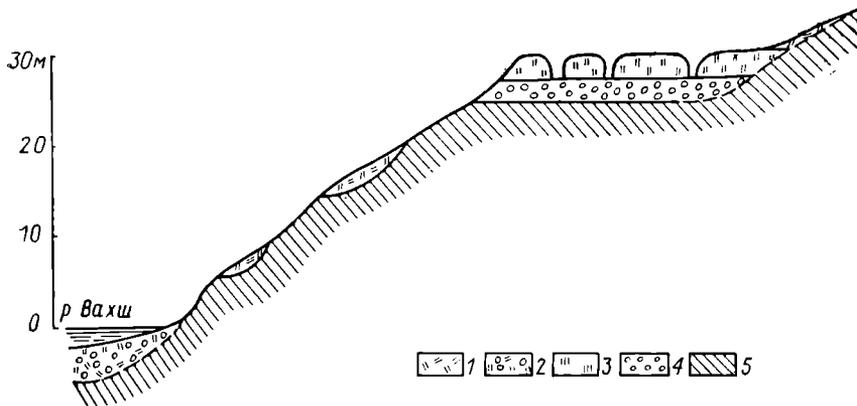


Рис. 1.4.

«Колодцы», образовавшиеся вследствие суффозии в лёссах, покрывающих древние аллювиальные отложения р. Вахша в районе г. Курган-Тюбе (схематический профиль).

1 — делювий; 2 — современный аллювий; 3 — лёсс; 4 — древний аллювий (галечник); 5 — пестроцветная глинисто-мергелистая толща неогена.

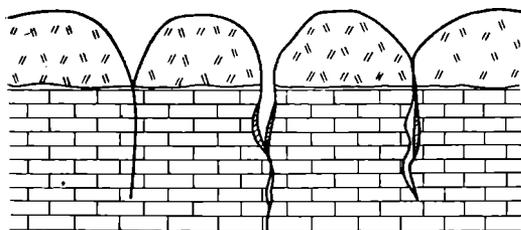


Рис. 1.5.

Суффозионные воронки в суглинках, покрывающих «сухие» закарстованные известняки (схема).

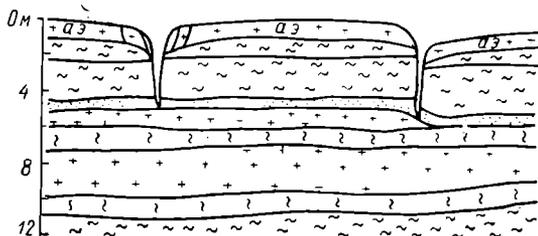
1 — четвертичные суглинки; 2 — известняки закарстованные; 3 — остаточные глины.

1 2 3

Рис. 1.6.

Разрез карстово-суффозионных воронок в Кургузульской бухте зал. Кара-Богаз-Гол, по Г. А. Васильеву и И. К. Поленову [28].

1 — соль первого горизонта; 2 — ил плотный и текучий; 3 — песок гипсовый; 4 — галит; 5 — глауберит.



1 2 3 4 5

3. Своеобразные суффозионно-карстовые воронки образуются в Кургузульской бухте зал. Кара-Богаз-Гол, где иловато-гипсовые отложения мощностью около 5 м покрывают пласт рыхлых солей (галита и глауберита) с пористостью 22—34% и весьма высокой проницаемостью (по данным многочисленных откачек), превышающей 1500, а в отдельных случаях доходящей почти до 3500 дарси. Крупные воронки имеют у поверхности диаметр 10—20 и глубину около 0,5 м; на дне их наблюдаются колодеобразные углубления диаметром 0,5—1,0 и глубиной 5—6 м, доходящие до соляного пласта. Образуются также многочисленные значительно более мелкие воронки [28] (рис. 1.6).

Образование суффозионно-карстовых воронок в данном случае обусловлено следующими двумя факторами: интенсивными эксплуатационными откачками межкристалльной рапы из горизонта солей, что вызывает понижение пьезометрического уровня слабонапорных вод этого горизонта (рапа используется для получения сульфата натрия), и затоплением бухты зимой (при нагонных ветрах) водами залива, инфильтрация которых в солевой горизонт является причиной суффозии и карстообразования.*

4. Инфлюация атмосферных вод по открытым и частично заполненным трещинам, карстовым каналам и т. п. также часто сопровождается суффозией, заключающейся в смыве и переносе мелких частиц со стенок трещин и с дневной поверхности. При этом проводимость трещин местами повышается (преимущественно в зоне аэрации), а на участках, где отлагается переносный материал, понижается (большей частью ниже уровня подземных вод, а также в зоне аэрации на участках изгибов и уменьшения раскрытия трещин).

5. Интенсивная, но захватывающая только небольшой объем пород суффозия развивается на участках выхода источников из рыхлых пород. При высоком дебите источника в местах выхода воды могут образоваться полости, заполняющиеся разрыхленной породой, состоящей преимущественно из крупных фракций и имеющей значительную проницаемость.

Вынос из трещин и полостей в жестких породах рыхлого материала происходит также в местах выхода значительных источников.

6. Искусственно суффозия создается при прокачке буровых скважин и других мероприятиях для увеличения их производительности.

В мелкозернистых песках, однородных по гранулометрическому составу, при интенсивной прокачке скважин через дырчатый фильтр образуются полости удлиненной извилистой формы, что ведет к значительному увеличению водопримной поверхности, причем производительность скважины может возрасти в несколько раз. Аналогичный метод применяется для увеличения

* Проникновение вод залива в солевой горизонт имеет отрицательное значение также потому, что ведет к разубоживанию рапы.

дебита забивных и сквозных фильтров при осушении горных выработок [79].

Кольматация горных пород может вызвать уменьшение их проницаемости почти до нуля. Мелкозернистые пески и скальные и полускальные породы, пересеченные сетью тонких трещин, кольматируются легко, но мощность закольматированной зоны у них не превышает первых десятков сантиметров. Значительные пустоты кольматируются медленно, а карстовые полости и каверны в эффузивах могут вообще не кольматироваться; мощность закольматированной зоны у трещиноватых пород с высокой проницаемостью может достигать нескольких метров.

VI. Физико-химическое воздействие воды с минеральным скелетом горных пород может влиять на их фильтрационные свойства при значительном содержании тонкодисперсных частиц и коллоидов, находящихся в рассеянном виде, а также в виде глинистых прослоев и включений. Существенное значение также имеет минералогический состав глинистых частиц, заключенных в породах: более всего подвержен физико-химическому воздействию воды монтмориллонит, менее всего каолинит, промежуточное положение занимают иллит и гидрослюды.

Основные виды физико-химического взаимодействия кратко охарактеризованы ниже.

1. Изменение агрегатного состояния характерно для глинистых пород, залегающих близ поверхности (глин, суглинков, иногда супесей), и заключается в образовании агрегатов, во много раз больших, чем исходные частицы, или распаде этих агрегатов. В первом случае породы приобретают комковатую или макропористую структуру и проницаемость их сильно увеличивается, иногда на несколько порядков. Во втором случае происходит потеря породой структуры, причем проницаемость понижается при полном разрушении структуры до величин, свойственных бесструктурным связным грунтам (10^{-4} — 10^{-6} дарси).

Описываемые процессы подробно изучены для почв и подпочвенного слоя [75]. Главной причиной образования агрегатов является воздействие вод с преобладанием ионов кальция и магния, а причиной разрушения их — воздействие натриевых вод, особенно щелочных, а также слабоминерализованных (например, при инфильтрации атмосферных вод).

2. Набухание глинистого материала, находящегося в песках и песчаниках в рассеянном виде или в форме включений и прослоев, может происходить и на значительной глубине вследствие притока воды иного химического состава, чем насыщающая породу в естественных условиях. Этот процесс имеет отрицательное значение для нагнетательных скважин при искусственном заводнении нефтяных пластов в сбросе промышленных сточных вод в глубокие горизонты. Снижение проницаемости пород горизонтов, предназначенных для закачки, чаще всего происходит при вытеснении воды высокой минерализации, закачиваемой слабоминера-

лизованной и особенно щелочной. Лабораторные и полевые исследования показали, что вытеснение соленой воды пресной может вызвать значительное понижение проницаемости песков, заключающих глинистый материал [114].

Опыты, произведенные в лаборатории ВСЕГИНГЕО, показали, что проницаемость среднезернистого песка, смешанного с 2% натрий-монтмориллонита, при фильтрации через него воды и растворов уменьшается приблизительно с $2 \cdot 10^{-2}$ (~ 16 м/сутки) до $1 \cdot 10^{-4}$ см·сек⁻¹ ($\sim 0,09$ м/сутки), т. е. в 200 раз. Концентрация растворов NaCl мало влияет на уменьшение проницаемости [85].

3. Фильтрация воды, содержащей поверхностно-активные вещества (ПАВ), через слабопроницаемые породы вызывает постепенное и замедленное дополнительное снижение проницаемости, которая после стабилизации может стать значительно меньше первоначальной. Этот процесс объясняется адсорбцией ПАВ на поверхности мелких частиц пород или на стенках тонких трещин [40].

4. Адсорбция воды на поверхности проводящих каналов (поровых или трещинных) уменьшает живое сечение их, что снижает проницаемость пород. Для слабопроницаемых пород с большой удельной поверхностью относительная величина уменьшения проницаемости может быть значительной. Существует обоснованная точка зрения [171], что для нахождения проницаемости подобных пород следует проводить опыты по определению газопроницаемости, а не водопроницаемости, поскольку толщина адсорбционной пленки у газов весьма мала.

§ 1.3 Степень изменчивости фильтрационных свойств. Фильтрационная анизотропия

Горные породы вследствие своей неоднородности и неравномерного расположения пустот всегда характеризуются большим или меньшим непостоянством фильтрационных свойств.

Породы, образующие пласты (осадочные, эффузивные, залегающие в виде покровов, и т. п.), обладают следующими видами изменчивости проницаемости и соответствующих ей параметров:

1) изменчивостью на площади распространения пласта среднего коэффициента проницаемости в направлении слоистости. Этот вид изменчивости имеет большое значение для установления обоснованных усредненных значений фильтрационных параметров, являющихся исходными величинами для различных гидрогеологических расчетов (водопритока^{*} в горные и другие выработки, потерь на фильтрацию в основании гидротехнических сооружений и т. п.).

Для пластов и толщ сильно колеблющейся мощности такое же значение имеет изменчивость их проводимости;

2) изменчивостью на площади распространения пласта среднего коэффициента проницаемости в направлении, нормальном

к слоистости. Соответствующие данные имеют значение для гидрогеологических расчетов, производимых для условий движения вод в этом или диагональном направлении, например потерь на фильтрацию из водохранилищ, каналов и т. п. при глубоком залегании грунтовых вод;

3) неоднородностью слоистых толщ и пластов в нормальном к напластованию направлении, выраженной проницаемостью и мощностью отдельных чередующихся слоев или при непрерывном изменении проницаемости соответствующими фактическими данными, подобными изображенным на рис. 9.3. Такой график может быть получен методом расходомерии (см. гл. 9).

При наличии надежной характеристики этого вида неоднородности можно рассчитать средние значения проницаемости как вдоль слоистости, так и в нормальном к ней направлении и количественно охарактеризовать фильтрационную анизотропию.

Изменчивость фильтрационных свойств у трещиноватых пород обычно значительна. Наряду с проницаемостью у них очень непостоянна фильтрационная анизотропия, причем быстро меняется как степень анизотропии (часто местами породы изотропны), так и ориентировка главных осей эллипсоида проницаемости, что зависит от неодинакового развития трещин в различных частях массива и изменяющейся ориентировки проводящих трещин.

Изменчивость фильтрационных свойств трещиноватых пород подчинена сложным закономерностям, установление которых часто связано с большими трудностями и, очевидно, должно производиться на основе всего имеющегося материала геологосъемочных, разведочных, гидрогеологических и геофизических работ.

Для выделения зон и участков различной проницаемости трещиноватых пород на профилях и картах имеют большое значение данные геофизических работ, особенно сейсмических методов разведки (см. § 2.7).

Для количественной оценки степени изменчивости коэффициента проницаемости (или фильтрации) и получения характерных значений их может быть целесообразной статистическая обработка имеющихся данных. В качестве варьирующей величины рекомендуется в первую очередь принимать для осадочных пород и эффузивных покровов среднее значение проницаемости в направлении слоистости и аналогично для массивных кристаллических пород и мощных толщ закарстованных пород — среднюю проницаемость верхней наиболее проницаемой зоны.

Статистическая обработка ведется обычными приемами [46]:

1) рассчитывается среднее арифметическое из имеющегося числа значений коэффициента проницаемости и среднее квадратическое отклонение σ по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon_i)^2}{n-1}}, \quad (1.3)$$

где $\varepsilon_i = k_{pi} - k_{п. ср}$ — отклонения отдельных значений коэффициента проницаемости от среднего арифметического;

2) рассчитывается коэффициент изменчивости ν по формуле

$$\nu = \sigma / k_{п. ср} \quad (1.4)$$

Для более полного представления о характере изменчивости проницаемости и упрощения расчетов при большом количестве фактических данных составляется график распределения. При этом для сильно изменчивых пород на график наносятся величины $\lg k_{п}$ (или $\lg k$) или значения другой функции коэффициента проницаемости, сглаживающей его резкие колебания (см. ниже). График распределения $\sqrt[3]{k}$ изображен на рис. 1.7;

3) дополнительно рекомендуется рассчитывать среднее отклонение $\varepsilon_{ср}$, что дает, однако, менее надежные результаты:

$$\varepsilon_{ср} = \frac{\sum |\varepsilon_i|}{n - 0,5}, \quad (1.5)$$

где $|\varepsilon_i|$ — абсолютные величины отдельных отклонений от среднего арифметического.

Кроме того, рекомендуется рассчитать относительное значение амплитуды изменения проницаемости α по формуле

$$\alpha = \frac{k_{п \max} - k_{п \min}}{k_{п, ср}}, \quad (1.6)$$

где $k_{п \max}$ и $k_{п \min}$ — соответственно максимальное и минимальное значения коэффициента проницаемости.

Степень изменчивости коэффициента проницаемости рекомендуется оценивать по данным табл. 1.1.

В основу рекомендуемой классификации приняты следующие положения:

1) постоянные (однородные) породы имеют коэффициент изменчивости проницаемости ν , одинаковый с обычными относительными погрешностями, получающимися при определении проницаемости по данным опытных фильтрационных работ ($\pm 25\%$);

2) слабо изменчивые породы имеют значение ν в 2 раза большее, изменчивые (неоднородные) — еще в 2 раза большее и т. д.;

3) отношение α/ν принято равным 3, что приблизительно соответствует имеющимся данным для конкретных условий.

Рекомендуемая классификация может быть также основой для установления степени изменчивости пластов, толщ или проницаемых зон у массивов трещиноватых и закарстованных пород. При этом расчеты производятся по той же схеме, но варьирующей величиной является полная проводимость пласта или зоны, т. е. произведение среднего в направлении слоев коэффициента проницаемости на мощность пласта или зоны.

Следует указать, что во избежание получения неверных результатов рекомендуемую классификацию можно применять

только для площади, где изучаемая толща или массив характеризуются однотипными геологическим строением и гидрогеологическими условиями.

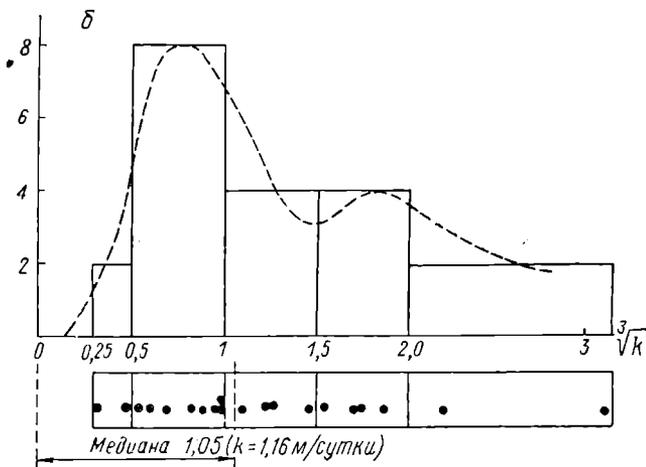
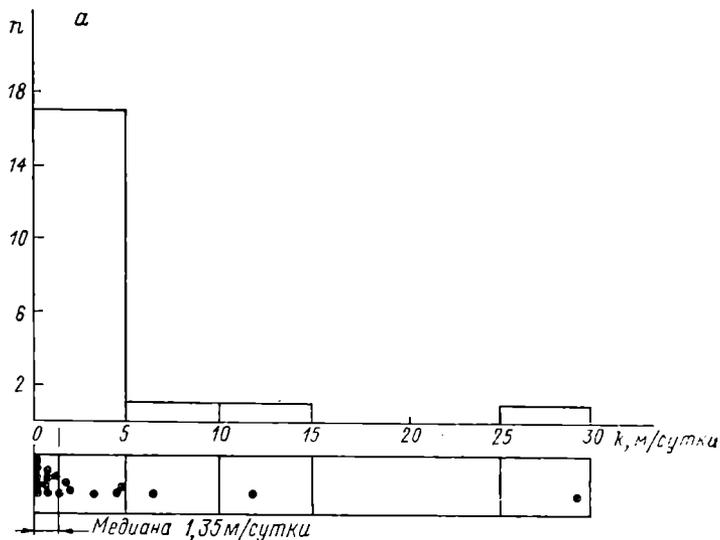


Рис. 1.7. Графики рассеяния и кривые распределения для горизонта трещиноватых известняков ордовика (месторождение Азери Эстонской ССР) [59].

Необходимое число значений коэффициента проницаемости, обеспечивающее удовлетворительные результаты статистической обработки, должно быть не менее 20—30, а для неоднородных

Таблица 1.1

Классификация горных пород по изменчивости коэффициента проницаемости

Группа	Характеристика породы по степени изменчивости коэффициента проницаемости	Коэффициент изменчивости γ	Относительная величина амплитуды изменения проницаемости α
1	Постоянная (однородная)	0,25	0,25
2	Слабо изменчивая	0,25—0,5	0,25—1,5
3	Изменчивая (неоднородная)	0,5—1,0	1,5—3,0
4	Сильно изменчивая *	1,0—2,0	4,0—6,0
5	Крайне изменчивая *	2,0	6,0

* Преимущественно трещиноватые и закарстованные породы.

пород соответственно бóльшим. Для однородных пород приемлемые результаты иногда получаются и при n порядка 15—20.

При статистической обработке и построении графика распределения проницаемости для трещиноватых пород с большим диапазоном ее изменения имеет смысл принять в качестве варьирующей величины значение $\sqrt[3]{k}$ при ламинарном движении воды, пропорциональное раскрытию трещин (см. § 4.2) и, как было указано, сглаживающее резкие изменения водопроницаемости.

Такой прием был применен автором при обработке результатов 20 откачек (16 из одиночных скважин и 4 кустовых), проведенных из известняков ордовика (глауконитовый и эхиносферитовый горизонты) мощностью около 20 м с целью получения исходных данных для прогноза водопритоков в открытые выработки, предназначенные для добычи фосфоритов месторождения Азери (Эстонская ССР).

Значения коэффициента проницаемости показаны на графике рассеяния, совмещенном с кривой распределения (рис. 1.7). Среднее арифметическое значение проницаемости 3,27 м/сутки, среднее квадратическое отклонение σ , рассчитанное по формуле (1.5), равно 6,1 м/сутки, что дает коэффициент изменчивости 1,86, т. е. согласно табл. 1.1 породы относятся к группе весьма изменчивых по проницаемости. По величине относительной амплитуды изменения проницаемости $\alpha = (29,3 - 0,02) / 3,27 = 9,1$ породы относятся к крайне изменчивым.

Построение графика распределения в координатах k и n (рис. 1.7, а) не дало закономерной кривой; тот же график в координатах $\sqrt[3]{k}$ и n дал двухвершинную кривую (рис. 1.7, б), первая вершина которой соответствует модальному значению $\sqrt[3]{k} = 0,75$, что дает $k = 0,42$ м/сутки и характеризует преобладающую систему сравнительно слабопроводящих трещин в известняках. Вторая вершина с модальным значением $\sqrt[3]{k} = 1,75$ и соответственно $k = 5,4$ м/сутки относится к менее распространенным, но крупным трещинам с высокой проводимостью.

Из двух значений коэффициента фильтрации (модального для крупных трещин, равного 5,4 м/сутки, и среднего арифметического 0,42 м/сутки) первое было принято в качестве исходной величины для расчета водопритока, так как при большой площади выработок последний определяется преимущественно трещинами с высокой проводимостью.

Однако, по мнению автора, величина $k = 5,4$ м/сутки недостаточно обоснована, так как высокие значения коэффициента фильтрации были получены только при откачке из трех скважин, причем одна из них дала $k = 29,3$ м/сутки, что, по-видимому, соответствует трещине или трещиноватой зоне, проводимость которой увеличена вследствие слабого карстообразования.

С целью установления пространственного положения и характера обнаруженной зоны высокой проницаемости известняков, а также получения более обоснованной расчетной величины коэффициента фильтрации было рекомендовано на участке, где $k = 29,3$ м/сутки, пробурить дополнительные скважины и произвести из них откачки.

В ряде случаев возможно также составление вероятностных графиков, преобразующих кривую распределения в прямую линию. Это облегчает нахождение наиболее вероятных и средних значений проницаемости и других параметров, а также величин, характеризующих степень их изменчивости.

Примером указанного являются результаты, полученные Б. Г. Самсоновым для нескольких водоносных горизонтов [135]. Б. Г. Самсоновым при построении графика распределения была применена вероятностная бумага, а варьирующей величиной считался логарифм коэффициента проницаемости. Это соответствует логнормальному распределению, при котором нормальному закону Гаусса подчинен логарифм варьирующей величины [127].

Г Л А В А 12

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ИХ ПО ОБЩИМ ГЕОЛОГИЧЕСКИМ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ВИДОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Фильтрационные свойства горных пород зависят от многочисленных факторов и очень разнообразны.

Многим генетическим типам и видам пород свойственны характерные величины пористости и проницаемости и определенный диапазон их возможных значений, большая или меньшая степень

постоянства фильтрационных параметров на площади распространения и наличие их закономерных изменений в вертикальном и горизонтальном направлении, обусловленных различными факторами. Для многих видов горных пород пористость и проницаемость зависят от их геологического возраста.

Окончательные результаты изучения фильтрационных свойств горных пород должны заключаться в надежном определении фильтрационных параметров, установлении степени их постоянства и закономерных изменений на исследуемой площади.

В первой стадии исследований, заключающихся в проведении комплексных геологической и гидрогеологической съемок с сопутствующими им неглубокими разведочными выработками, геофизических работ и лабораторных определений, производится предварительная оценка порядка величины пористости и проницаемости изучаемых пород и создаются общие представления о степени их постоянства и закономерных изменениях.

При изучении фильтрационных свойств пород глубоко залегающих горизонтов, кроме того, производятся обобщение и анализ материалов, полученных при бурении в исследуемом районе и вблизи него глубоких скважин (опорных, разведочных и эксплуатационных). При этом используются геологическая и техническая документация, данные различных видов каротажа и лабораторных определений. При отсутствии ранее пробуренных глубоких скважин может потребоваться бурение специальных гидрогеологических скважин.

Если исследования в первой стадии проведены удовлетворительно и с необходимой детальностью, то их результаты дают возможность запроектировать и произвести опытные работы в объеме, соответствующем степени постоянства проницаемости и других характеристик изучаемых пород, а также применить методику и технику работ, соответствующих природным условиям района.

Приближенная оценка фильтрационных свойств облегчается также при использовании характеристик различных пород, приведенных ниже (см. табл. 2.3).

Несоблюдение элементарных указаний может привести к неправильной постановке детальных исследований и к грубым ошибкам. Пучительным примером этого являются исследования, проведенные по обоснованию проекта плотины для ирригации в предгорьях Алтая. При работах 1969—1970 гг. были получены и выданы проектировщикам значения коэффициента фильтрации (для современного и древнего аллювия и древнего пролювия) порядка нескольких метров в сутки, признанные экспертизой сильно заниженными. Дополнительные исследования, проведенные в 1971—1972 гг., показали, что фактические коэффициенты фильтрации указанных пород в 12—15 раз выше. Причины допущенных ошибок следующие:

1) визуальная оценка аллювиальных разнозернистых песков с мелкой галькой, по-видимому, своевременно не проводилась;

2) древние пролювиальные отложения, представляющие собой лишьобразное чередование суглинков и супесей со слабоокатанным гравием и галькой, считались озерно-аллювиальными супесями с гравием и галькой, что вызвано невалифицированным описанием или неудовлетворительным отбором зерна. Керн, поднятый и описанный в 1972 г., показал ясно литологию данных отложений; пролювиальное их происхождение в районе исследований подтверждается также литературными материалами [7];

3) бурение опытных скважин проводилось с глинистой промывкой (применялся глинопорошок с высоким содержанием монтмориллонита). Осветление воды после прокачки считалось признаком деглинзации, что неверно [11].

Имелись еще существенные недочеты в методике и технике исследований.

§ 2.1. Обломочные несцементированные породы

Проницаемость обломочных несцементированных пород зависит преимущественно от размера пор (см. § 1.1) и, следовательно, от гранулометрического состава пород. В меньшей степени на проницаемость этих пород влияет форма зерен и уплотненность породы.

Проницаемость описываемых пород зависит преимущественно от содержания мелких фракций, что очевидно на основании известных формул для расчета коэффициента фильтрации по гранулометрическому составу, приведенных во всех руководствах и справочниках по гидрогеологии и инженерной геологии [145]. Однако для некоторых видов рассматриваемых пород проницаемость значительно выше соответствующей их гранулометрическому составу. К таким породам относятся некоторые виды суглинков, имеющие комковатую структуру, а также лёсы и лёссовидные суглинки, характеризующиеся макропористостью.

Обломочные породы часто представляют собой чередование слоев различного гранулометрического состава и проницаемости, вследствие чего обладают фильтрационной анизотропией, иногда значительной. Фильтрационная анизотропия свойственна также лёсам и лёссовидным суглинкам, их проницаемость в вертикальном направлении больше, чем в горизонтальном.

Ниже приводится краткая характеристика фильтрационных свойств различных по генезису обломочных несцементированных пород.

1. Аллювиальные отложения очень разнообразны; наиболее высокая проницаемость их (до нескольких тысяч дарси) характерна для аллювия горных рек на суженных участках русла с быстрым течением, соответствующих обычно пересечению рекой твердых пород. Здесь аллювий представлен промытыми галечниками и валунно-галечными отложениями без заполнителя. Такие аллю-

виальные отложения во время паводков могут перемываться и переотлагаться, меняя свой гранулометрический состав и проницаемость, а иногда также и мощность*.

На участках горных рек со сравнительно медленным течением преобладают галечники с песчаным заполнителем и песчано-галечные и гравийные отложения, проницаемость которых обычно не превышает 100 дарси, а местами уменьшается до 20—30. На таких участках горных рек аллювий также непостоянен в направлении, нормальном к оси долины, что вызвано блужданием русла, наличием рукавов, староречий и т. п.

Гранулометрический состав и проницаемость аллювия горных рек зависят также от характера пород, распространенных в области водосбора. Так, при широком развитии в этой области непрочных, легкоразмываемых пород аллювий обогащается мелкоземом и становится малопроницаемым.

При выходе горных рек на равнину аллювиальные отложения образуют пологий конус выноса, в направлении периферии которого они обогащаются мелкими фракциями и становятся менее проницаемыми.

В вертикальном разрезе аллювиальные отложения горных рек также неоднородны, что выражается в неправильной слоистости, а на участках сравнительно медленного течения реки наличием выклинивающихся слоев малопроницаемых пород, суглинков, супесей, иловатых песков и т. п., представляющих собой отложения стариц слепых рукавов и прибрежных заводей.

Мощные аллювиальные отложения часто расчленяются на отдельные горизонты, представленные породами различного гранулометрического состава и проницаемости. Такое строение аллювия отражает геологическую историю долины, в частности изменения скорости течения, вызванного подпором реки при обвалах, дифференциальными движениями земной коры и т. п.

Древние аллювиальные отложения надпойменных террас в горных и предгорных районах часто расчленяются на два горизонта: верхний, состоящий преимущественно из слабопроницаемых суглинков и супесей, и нижний, представленный песчано-галечными отложениями или грубозернистыми песками с галькой и гравием, с проницаемостью, на несколько порядков большей, чем у верхнего горизонта.

Аллювиальные отложения больших равнинных рек (Волги, Камы, Днепра, рек Сибири в равнинной их части, а также аналогичных рек в США и других странах) представлены преимущественно песками, для которых наиболее характерны значения проницаемости от 10 до 100 дарси.

* При исследованиях для Чиркейской плотины на р. Сулак (см. § 1.2) бурение в русле в самом узком месте каьона (шириной на урезе воды 7—9 м) показано, что мощность галечников в марте 1932 г. после зимнего маловодья достигала 12 м, а в августе того же года после высокого паводка уменьшалась почти до нуля [60].

Среди песков в подчиненном количестве встречаются выклинивающиеся прослойки песчано-гравийных и песчано-галечных отложений, а также (преимущественно в нижнем течении) слабопроницаемые слои тонкозернистых песков, супесей и суглинков. Такие же породы развиты на надпойменных террасах, где они иногда образуют почти сплошные горизонты небольшой мощности, покрывающие породы со значительно большей проницаемостью.

Аллювий небольших равнинных рек со спокойным течением (типа Цны, Суры и др.) может быть на большом протяжении представлен иловатыми и глинистыми породами с низкой проницаемостью.

Невысокая проницаемость и хорошо выраженная фильтрационная анизотропия свойственны дельтовым отложениям, что обусловлено их литологией.

Физико-геологические процессы, протекающие после отложения аллювиального материала, вызывающие изменение его проницаемости, рассмотрены в гл. 1. Наибольшее распространение и значение для аллювия имеют суффозия и кольятация.

2. Пролувиальные отложения по фильтрационным свойствам близки к аллювиальным, но более неоднородны. Кроме того, пролувий обычно богаче, чем аллювий, тонкодисперсным материалом. В горных районах пролувий часто представляет собой консолидировавшийся силевые выносы, состоящие преимущественно из суглинистого материала с обломками твердых пород различного размера и формы. Такой пролувий имеет в среднем небольшую проницаемость, но часто заключает значительно более проницаемые песчаные или песчано-галечные отложения, образующие рукавообразные скопления, вытянутые в направлении отложивших их временных потоков.

В предгорных районах пролувий часто образует конусы выноса, характеризующиеся переходом хорошо проницаемых песчано-галечных отложений в слабопроницаемые суглинисто-супесчаные, происходящим неравномерно и представленным линзообразным чередованием пород различного гранулометрического состава и проницаемости.

Гидрогеологические условия конусов выноса предгорных районов Узбекистана подробно изучены и описаны О. К. Ланге [87].

3. Делювиальные отложения имеют весьма разнообразный вещественный состав и проницаемость и характеризуются обычно очень большой неоднородностью. Наряду с делювием, представленным щебнем и скоплениями крупных обломков твердых пород без заполнителя, имеющим чрезвычайно высокую проницаемость, нередко встречается суглинистый или глинистый слабопроницаемый делювий, причем оба вида могут на небольшом участке сменить друг друга. Состав делювия и его проницаемость зависят в большой степени от характера материнских пород и продуктов их выветривания. Существенное значение имеют также климати-

ческие условия (влажный и теплый климат способствует развитию глинистого делювия).

4. Элювиальные отложения по сравнению с делювиальными характеризуются вообще большей однородностью. Это относится в первую очередь к элювию интрузивных пород, образующемуся в условиях теплого и влажного климата, имеющему невысокую проницаемость, как было указано выше (см. § 1.2) при описании явлений выветривания.

5. Флювиогляциальные отложения по фильтрационным свойствам близки к аллювиальным, но более разнообразны по условиям распространения.

Флювиогляциальные отложения в области четвертичных оледенений имеют значительный диапазон проницаемости.

Высокой проницаемостью, иногда достигающей до 30—50 дарси и даже более, обладают песчано-галечные отложения озов. Они довольно выдержанны по гранулометрическому составу и проницаемости вдоль озовых гряд, но менее постоянны в поперечном направлении.

По мере удаления от границы ледниковых покровов флювиогляциальные отложения становятся более мелкозернистыми и менее проницаемыми. На территории древних оледенений также встречаются мелко- и тонкозернистые пески с проницаемостью, не превышающей нескольких дарси, причем может наблюдаться резкое изменение проницаемости на небольшом протяжении. Примером сказанного являются межморенные отложения в г. Зеленогорске и пос. Комарово на побережье Финского залива в Ленинградской области.

В г. Зеленогорске две буровые скважины самоизливали с дебитом около 75 л/сек, вода выносила крупный песок и гравий; тампонирующее этих скважин, произведенное для предотвращения просадок и деформаций ближайших зданий, было затрудненным. Проницаемость флювиогляциальных отложений здесь была не менее 100 дарси. Скважина в Комарове (на расстоянии около 4 км от Зеленогорска), пробуренная для водоснабжения дачного поселка, вскрывшая тот же горизонт, представленный здесь мелкозернистыми песками, дала дебит всего 0,1 л/сек (проницаемость межморенных отложений была здесь всего порядка десятых долей дарси). Для водоснабжения пришлось использовать воду гдовского горизонта нижнего кембрия.

Проницаемостью, не превышающей нескольких дарси, редко достигающей до 10 дарси, обладают камовые пески, имеющие обычно довольно однообразный гранулометрический состав и слабовыраженную слоистость.

Пески различной крупности зерна, распространенные на заандровых полях, имеют проницаемость преимущественно порядка первых десятков дарси.

На гранулометрический состав и проницаемость флювиогляциальных образований, так же как и аллювия, сильно влияет вещественный состав пород, распространенных в бассейне отлагавших их водных потоков.

Современные флювиогляциальные отложения, образующиеся при таянии ледников в высокогорных районах и в Арктике, по фильтрационным свойствам близки к аллювию горных районов.

Моренные отложения очень неоднородны, их гранулометрический состав в большей степени зависит от характера материнских пород. В области сплошного распространения скальных пород морены представляют собой преимущественно валунно-галечные отложения с песчаным заполнителем и проницаемостью порядка нескольких десятков дарси. Таковы, например, морены на Кольском полуострове и в Карелии. В районах развития осадочных пород, заключающих пласты глин или глинистых сланцев, а также пород, дающих при разрушении глинистый материал, морены представлены преимущественно слабопроницаемыми валунными глинами и суглинками, среди которых присутствуют породы со сравнительно высокой проницаемостью: супеси, пески, иногда песчано-галечные породы, встречающиеся в виде выклинивающихся прослоев и линз.

Конечные морены обычно бедней глинистым материалом, чем донные, развитые в том же районе, и поэтому имеют более высокую проницаемость.

6. Несцементированные породы морского происхождения также разнообразны по гранулометрическому составу и проницаемости. В основании крутых берегов, сложенных скальными породами, в зоне прибоя — это галечники и песчано-галечные отложения с высокой проницаемостью, достигающей иногда более 100 дарси. По мере удаления от берега и увеличения глубин у рассматриваемых пород повышается содержание мелких фракций и уменьшается проницаемость. Однако при непостоянстве глубин, наличии отмелей, островов и изрезанности береговой линии это происходит неравномерно; в заливах, отдаленных от открытого моря отмелями и косами, препятствующими волновой деятельности, отлагаются иловатые и глинистые осадки со слабой проницаемостью. В области значительных глубин развиты, как известно, также иловатые и глинистые весьма слабопроницаемые осадки.

Однообразный гранулометрический состав и проницаемость порядка нескольких дарси имеют песчаные отложения мелководных морей и во многих районах отложения шельфовой зоны.

В СССР пески развиты во многих местах на побережье Азовского и Каспийского морей. К ним близки верхнечетвертичные польдиевые и литориновые пески, развитые на северо-западе европейской части СССР.

Однообразные пески морского происхождения с проницаемостью порядка нескольких дарси встречаются среди древних отложений платформенных областей вплоть до нижнего кембрия. Эти пески на глубине сильно уплотнены и переходят в слабосцементированные непрочные песчаники, обычно чередующиеся с ними. Соотношение между песками и песчаниками меняется в зависимости от глубины и других факторов; в области платформ

на глубине свыше 1000—1500 м (редко 2000) пески обычно уже не встречаются. В складчатых толщах цементация песков происходит на значительно меньшей глубине.

Ниже приводятся примеры нахождения песков на значительной глубине и их характеристика.

1. Гдовский горизонт (нижний кембрий) распространен на северо-западе Русской платформы. В районе Ленинграда он представлен слабоцементированными песчаниками, переходящими в плотные пески, и имеет мощность от 80 до 100 м, залегая на глубине 90—150 м от поверхности. По данным многолетней эксплуатации средний коэффициент фильтрации пород горизонта в этом районе равен около 4 м/сутки, причем пески составляют несколько более 50% общей его мощности. При погружении толщи в восточном и юго-восточном направлениях содержание песков убывает и соответственно уменьшается проницаемость пород. На глубине около 300 м вся толща представлена только песчаниками.

2. Среднедевонские отложения, вскрытые рядом скважин в центральной части Русской платформы, заключают три горизонта слабоцементированных песчаников, переходящих в очень плотные пески. Эти горизонты изучены различными методами при исследовании скважин, пробуренных в г. Тамбове для сброса промышленных стоков Тамбовского химкомбината. Основные данные, характеризующие указанные горизонты, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

*Фильтрационные свойства девонских песчаников и песков, г. Тамбов **

Наименование горизонта	Глубина залегания, м		Средняя мощность, м	Проницаемость, дарси	Примечание
	от	до			
Старооскольский	692—694	704,5—705	11,8	1,6—1,3	
Воробьевский	720	730	8,0	3,7—4,6	С глубины 723,5 до 725 м в скв. 1 слой слабопроницаемого алевролита
Рязский	838	850	12,5	1,4—1,5	В основании горизонта песчаники переходят в гравелиты

* Сведения получены от инженера-гидрогеолога Л. П. Ногаевой, в течение нескольких лет проводившей исследования скважин в г. Тамбове и обработку полученных данных. Приведены средние значения параметров по скв. 1 и 2.

3. Еще одним примером древних обломочных пород, заключающих на большой глубине плотные пески, является угленосная свита визейского яруса нижнего карбона. Породы этой свиты: мелкозернистые пески и алевролиты (переходящие в песчаники и алевролиты по мере погружения на глубину), а также глинистые и углистые породы и пласты бурых и каменных углей — это преимущественно отложения мелкого моря и лагун и, вероятно, частью также озерно-аллювиальные.

Угленосная свита встречена многочисленными буровыми скважинами в пределах центральной и восточной частей Русской платформы.

В Подмосковном буроугольном бассейне в свите преобладают мелко- и среднезернистые пески, проницаемость которых преимущественно от 0,5 до 2 дарси. Глубина залегания свиты здесь не более 200 м. Восточнее, в бассейне Волги и Камы, свита погружается до глубины около 1500 м. В районе г. Набережные Челны свита представлена слабосцементированными песчаниками, среди которых в подчиненном количестве встречаются очень плотные пески. Проницаемость пород здесь 0,5—2 дарси при глубине залегания 975—1050 м. Еще восточнее, в районе Краснокамска, свита состоит исключительно из песчаников, пористость которых 10—12%, а проницаемость 0,5—1 дарси.

7. Озерные и озерно-аллювиальные отложения имеют разнообразные фильтрационные свойства. Отложения больших озер типа Ладожского и Онежского близки к морским. Отложения малых озер со слабой волновой деятельностью большей частью мелкозернисты и слабопроницаемы. Такой же характер свойствен отложениям больших озер, в бассейне которых твердые породы отсутствуют или имеют незначительное распространение. Эти отложения нередко имеют сезонную слоистость и поэтому хорошо выраженную фильтрационную анизотропию (проницаемость в направлении слоев может на два-три порядка, а иногда и более превышать проницаемость в нормальном к слоям направлении). Типичным представителем подобных пород являются хорошо известные позднеледниковые ленточные глины и суглинки северо-запада европейской части СССР. Их проницаемость в горизонтальном направлении порядка сотых долей дарси, в вертикальном близка к нулю.

8. Эоловые отложения — дюнные и барханные пески — в противоположность другим генетическим типам рыхлых пород характеризуются относительным постоянством своего гранулометрического состава и фильтрационных свойств. Проницаемость эоловых песков обычно от 1 до 2—3 дарси.

9. Лёссов и лёссовидные суглинки имеют небольшую проницаемость и хорошо выраженную фильтрационную анизотропию; водопроницаемость этих пород в горизонтальном направлении чаще всего от 0,2 до 3,0, в вертикальном от 3—5 до 5—10 дарси. Коэффициент анизотропии лёссов преимущественно от 3 до 15, в среднем около 10 [90].

Просадка лёссов вызывает сильное уменьшение их проницаемости. При полной просадке (под нагрузкой), когда исчезают макропоры, проницаемость лёссов уменьшается до величины, соответствующей их гранулометрическому составу (10^{-5} — 10^{-6} дарси). При интенсивном замачивании лёссов еще до просадки проницаемость может понизиться в 2—5 раз. Лёссовидные суглинки характеризуются теми же свойствами, но выраженными слабее.

Более подробные данные о фильтрационных свойствах лёссов имеются в монографии А. К. Ларионова, В. А. Приклонского и В. Г. Ананьева [90].

10. Торфы и торфянистые породы имеют своеобразные фильтрационные свойства. Проницаемость торфа находится в прямой зависимости от градиента напора и стабилизируется при градиентах порядка 2—3. Кроме того, торф обладает ясно выраженным начальным градиентом, величина которого может достигать 1,0—1,5. Типичный график зависимости проницаемости торфа от градиента показан на рис. 2.1.

Стабильная проницаемость слаборазложившегося торфа обычно 0,1—1, сильно разложившегося 0,01—0,1 дарси и меньше.

Пористость и влагоемкость торфа очень высокие; для слабо-разложившегося торфа может достигать 50—60, для хорошо раз-

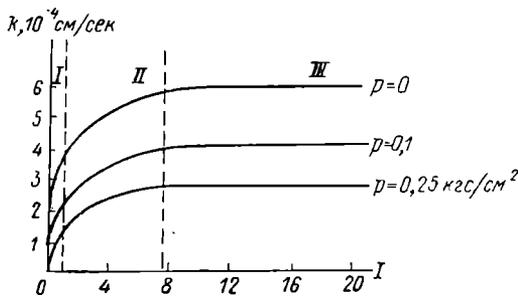


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента фильтрации торфа от градиента напора при различных уплотняющих давлениях [74].

Торф тоншой в естественных условиях: приведенная пористость $\epsilon = 12,0$; влажность $W = 760\%$; степень разложившегося $R = 10\%$.

Участок: I — область начального градиента, $k \approx 0$; II — переходная область, $k = f(I)$; $I \geq I_0$ (I_0 — начальный градиент); III — область коэффициента фильтрации, практически не зависящего от градиента.

ложившегося более 100—150%. При уплотнении под нагрузкой пористость и проницаемость торфа сильно уменьшаются.

❖ Специфические фильтрационные свойства торфа зависят от содержания в нем органических коллоидов; у торфянистых грунтов эти свойства ослабевают соответственно увеличению содержания минеральных примесей [74].

§ 2.2. Пористые обломочные сцементированные породы

Проницаемость пористых обломочных сцементированных пород зависит главным образом от размеров и формы поперечного сечения поровых каналов и, следовательно, от размера зерен, а также от относительного количества цемента и вида цементации.

Наибольшую проницаемость имеют породы с контактовым цементом и цементом обрастания [111]. Породы с базальным цементом и цементом пор практически непроницаемы, если они не имеют проводящих трещин, так как в данном случае почти отсутствуют сообщающиеся друг с другом поры; общая пористость таких пород обычно не превышает 4—7%.

Проницаемость пород, рассматриваемых в данном параграфе, чаще всего изменяется в пределах от сотых и десятых долей до

нескольких дарси; редко она достигает 15—20 дарси. Зависимость проницаемости от размеров частиц выражена у сцементированных пород слабее, чем у соответствующих рыхлых отложений. Высокая проницаемость, свойственная галечникам и другим грубообломочным несцементированным породам, у описываемых пород никогда не наблюдается, так как пустоты у них в процессе диагенеза заполняются не только цементирующим веществом, но также более мелкозернистым обломочным материалом.

Генезис пород данной группы влияет на их фильтрационные свойства значительно слабее, чем у рыхлых обломочных пород. Преимущественно генезис влияет на степень постоянства и закономерные изменения пористости и проницаемости в различных направлениях. Меньшее значение генезиса в данном случае объясняется более существенным воздействием на проницаемость процессов диагенеза и особенно цементации.

Геологический возраст также сравнительно слабо влияет на фильтрационные свойства рассматриваемых пород, образующих осадочный чехол платформенных областей. Однако при переходе к более древним сильнодислоцированным породам фундамента влияние его весьма существенно.

В горно-складчатых областях более древние породы рассматриваемой группы обычно сильно дислоцированы и плотно сцементированы, поэтому их пористость и проницаемость низкие. Более молодые слабодислоцированные породы (обычно несогласно залегающие на более древних) могут в тех же районах сохранить пористость и проницаемость того же порядка, что и исходные рыхлые осадки.

Например, в ряде районов Кавказа и других альпийских горных систем сильнодислоцированные палеозойские, а нередко и мезозойские обломочные породы плотно сцементированы и имеют незначительные пористость и проницаемость, а неогеновые почти не дислоцированные породы того же типа сохраняют пористость и проницаемость, лишь немного меньшие, чем у рыхлых пород, из которых они образованы.

С глубиной пористость и проницаемость описываемых пород уменьшаются. В платформенных областях с глубины от 1000 до 2000 м (неодинакова в различных районах) проницаемость редко превышает десятые доли дарси. Еще глубже обломочные сцементированные породы становятся почти непроницаемыми, так как вследствие цементации исчезают поры, сообщающиеся друг с другом; незначительная проницаемость на этих глубинах обычно является следствием трещиноватости. У сильнодислоцированных пород проницаемость снижается до малых величин на меньших глубинах (исключая зоны крупных молодых разломов).

Примером древних сцементированных обломочных пород, сохранивших открытую пористость и связанную с нею проницаемость, может служить упомянутая выше (см. § 2.1) угленосная свита визейского яруса нижнего

карбона в пределах Волго-Уральской области, где на глубинах более 1200 м она не заключает нецементированных пород.

В районе Краснокамско-Полазненского вала угленосная свита залегает на глубине от 1250 до 1360 м; проницаемыми породами свиты являются здесь мелкозернистые песчаники и алевролиты, имеющие эффективную пористость в среднем 15—17% и проницаемость 0,7 дарси. Лабораторные определения проницаемости, произведенные для образцов керн, дали значения от 0,17 до 0,73 дарси.

§ 2.3. Слабопроницаемые породы, образующие пласты, разделяющие водоносные горизонты

Проницаемость пород, образующих пласты, разделяющие водоносные горизонты (плотных глин, мергелей, аргиллитов и т. п.), обычно на несколько порядков меньше, чем у пород этих горизонтов, но переток воды через такие пласты из одного горизонта в другой может иметь существенное значение вследствие большой площади фильтрации, измеряемой обычно десятками, а нередко и сотнями квадратных километров [69].

Поскольку переток происходит в направлении, нормальном к слоистости, для суждения о его интенсивности необходимо иметь представление о средней проницаемости разделяющих пластов в этом направлении. Разделяющие пласты часто представлены чередованием пород различной проницаемости, в том числе алевролитов и мелкозернистых песчаников, вследствие чего средняя проницаемость этих пластов в направлении слоистости значительно больше, чем в нормальном к ней направлении. Последняя обычно имеет величину порядка 10^{-4} и 10^{-5} дарси.

Фильтрация через плотные глины, по данным ряда исследований [131, 132], характеризуется наличием начального градиента, что имеет большое значение для условий перетока. Вопрос о начальном градиенте и его природе дискуссионный и рассматривается далее (см. § 3.3).

§ 2.4. Трещиноватые породы

Трещиноватые породы характеризуются сложными условиями движения подземных вод, широким диапазоном значений проницаемости, большой неоднородностью и во многих случаях фильтрационной анизотропией.

Коэффициент проницаемости трещиноватых пород может достигать нескольких сотен дарси, а иногда на отдельных участках даже превышать тысячу дарси, причем проницаемость может измениться на несколько порядков на протяжении нескольких метров.

Пустотность (трещинная пористость) трещиноватых пород незначительна и обычно изменяется в пределах от нуля до 2—3%, редко достигая 5—6. Чаще всего пустотность равна нескольким сотым или десятым долям процента.

Проницаемость трещиноватых пород зависит от проводимости трещин, для незаполненных трещин пропорциональной третьей степени раскрытия (см. § 4.2), и от их количества.

Заполнение трещин может быть сплошным или частичным. При сплошном заполнении трещин их проводимость сильно уменьшается, даже если заполнитель имеет значительную проницаемость. Частичное заполнение трещин вызывает уменьшение площади поперечного сечения ходов, по которым движется вода, почему проводимость трещин снижается, но порядок не может оставаться таким же, как для незаполненных трещин.

Частота трещин связана с проницаемостью прямой пропорциональностью и поэтому влияет на последнюю в меньшей степени, чем их раскрытие.

Проницаемость реальных горных пород, пересеченных трещинами различной проводимости, зависит преимущественно от крупных незаполненных или частично заполненных трещин с большим раскрытием; тонкие же трещины играют подчиненную роль, даже если сеть их очень густая.

Для фильтрационных свойств трещиноватых горных пород имеет значение также геометрия трещиноватости, т. е. ориентировка трещин различных систем, их протяжение, степень извилистости, постоянство раскрытия, характер неровностей («скульптура») стенок и т. п.

Ниже рассматривается проводимость трещин различного генезиса и вида.

1. Первичные литогенетические трещины и трещины напластования осадочных пород характеризуются очень малой первоначальной проводимостью, которая в дальнейшем нередко увеличивается вследствие тектонических движений и экзогенных физико-геологических процессов.

2. Первичные трещины отдельности интрузивных пород, образующиеся при остывании магматических тел и сопутствующих вязких течений магмы, имеют первоначально низкую проводимость, однако неодинаковую для трещин различных систем.

Классическими работами Г. Клосса [175] было установлено наличие четырех систем первичных трещин отдельности у крупных интрузий гранитоидов. Трещины двух систем образовались вследствие сжимающих напряжений, они плотно сомкнуты и имеют проводимость, близкую к нулю. Трещины двух других систем возникли в результате действия растягивающих и скалывающих напряжений и имеют несколько большую проводимость.

Если в последующие геологические периоды интрузивные тела выходят на поверхность или приближаются к ней из-за поднятий земной коры и процессов денудации, то трещины первых двух систем обычно незначительно увеличивают свое раскрытие и проводимость из-за экзогенных процессов; трещины же, образовавшиеся вследствие растягивающих и скалывающих усилий,

могут значительно расширяться и приобретать высокую проводимость.

3. Первичные трещины отдельности основных эффузивных пород, образующие характерную столбчатую отдельность у базальтов и андезито-базальтов, имеют раскрытие, достигающее нескольких миллиметров, обычно не заполнены и характеризуются высокой проводимостью. Вследствие этого молодые лавовые покровы обладают значительной проницаемостью.

У кислых эффузивных пород трещины отдельности имеют обычно несколько меньшую проводимость и частоту, почему проницаемость этих пород, как правило, меньше, чем основных. Но имеются также примеры высокой проницаемости кислых эффузивов, на что указывают выходящие из них обильные источники (см. ниже).

Первичные трещины отдельности эффузивных пород, возникшие при подводных излияниях лавы, имеют сфероидальную (скорлуповатую) форму и незначительное раскрытие. Нередко наблюдается их частичное минеральное заполнение; проводимость этих трещин небольшая, и соответственно проницаемость эффузивных пород, образовавшихся при подводных излияниях, значительно меньше, чем у лавовых покровов [107].

Трещины первичной отдельности эффузивных пород быстро «залечиваются», заполняясь различными минералами, почему проницаемость более древних эффузивов, начиная с неогеновых, меньше, чем у более молодых.

4. Трещины выветривания, донной и бортовой разгрузки и трещины, вызванные изменением объема горных пород, а также трещины гравитационного происхождения описаны в § 1.2.

5. Трещины, образующиеся вследствие усадки тонкого поверхностного слоя глинистого грунта, имеющего первоначально текучую или мягкопластичную консистенцию, обычно зияющие с раскрытием до 2—3 см, разбивают глинистый слой на полигональные отдельности и распространяются вглубь не более чем на 0,5—2 м. Проводимость этих трещин очень высокая. В засушливых районах они образуются на такырах и во время обильных осадков, выпадающих после продолжительного засушливого периода, могут проводить вглубь значительное количество воды и питать неглубоко залегающие водоносные горизонты, что имеет значение для местного водоснабжения.

6. Трещины взрыва образуются при проходке горных выработок, котлованов, при торпедировании буровых скважин, а также при взрывах бомб, мин, снарядов и т. п. [107]. Эти трещины окружают очаги взрыва, образуя трещиноватую зону с проницаемостью, постепенно уменьшающейся от центра к периферии. Трещины взрыва крайне непостоянны по ориентировке, раскрытию и характеру заполнения. Вблизи очага взрыва они часто бывают зияющими или заполнены крупными обломками. Проводимость трещин взрыва зависит от состава пород и силы взрыва,

наибольшая проводимость их наблюдается в твердых породах (невыветрелых магматических породах, гнейсах, кварцевых песчаниках, чистых известняках и т. п.), при разрушении которых не образуется значительного количества тонкого материала.

Данные о проводимости и других гидрогеологических особенностях трещин различного происхождения сведены в табл. 2.2, составленную с учетом гидравлической классификации трещиноватости, предложенной Г. М. Ломие [94], классификаций А. С. Храмушева [155], Н. И. Плотникова, М. В. Сыроватко и Д. И. Щеголева [120], а также работы Л. И. Нейштадт и И. А. Пирогова [107], которая является наиболее новой и обобщает данные большинства предшествующих исследований. Автором использованы также данные о трещиноватости горных пород, имеющиеся в монографии В. В. Белоусова [13] и в ряде других работ.

Основной закономерностью для большинства скальных и полускальных трещиноватых пород является уменьшение их проницаемости с глубиной в пределе до величины, близкой к нулю, причем наблюдается следующее:

1) уменьшение проницаемости трещиноватых пород в зависимости от глубины происходит неравномерно, скачкообразно, так что участки более высокой проницаемости сменяются интервалами малопроницаемых пород. Это очень хорошо выражено на эпюрах удельного водопоглощения, составляемых по данным поинтервальных опытных нагнетаний, проводимых при исследованиях для гидротехнических сооружений (см. рис. 1.1);

2) глубина залегания практически непроницаемых пород может изменяться в пределах от 10—15 до 200 м, иногда она превышает 200 м.

У мощных покровов неовулканических пород зона практически непроницаемых пород отсутствует, если только не происходит смены трещиноватых эффузивов плотными туфами, туфопесчаником и т. п.

Как неоднократно упоминалось, уменьшения проницаемости с глубиной не происходит также в зонах крупных молодых разломов и вблизи активных магматических очагов.

При сложном рельефе поверхность практически непроницаемых трещиноватых пород вообще повторяет в сглаженном виде очертание дневной поверхности. Но на участках тектонических нарушений, на сильно изрезанных склонах, в местах прохождения трещин бортовой разгрузки глубина залегания этой поверхности возрастает. Неоднородность состава трещиноватых пород, контакты одних пород с другими и т. п. также являются причиной неровностей этой поверхности, местных ее переуглублений или выступов. Изложенное иллюстрируется схематическим профилем по оси Чиркейской плотины на р. Сулак (см. рис. 1.1).

Ниже приведены основные сведения о фильтрационных свойствах трещиноватых пород различного генезиса и состава, иллюстрируемые рядом примеров.

I. Интрузивные породы отличаются четким проявлением основных закономерностей, свойственных трещиноватым породам: уменьшением проницаемости с глубиной, зависимостью ее от тектонической нарушенности, разгрузки и других экзогенных факторов.

Влияние петрографического состава и структуры на фильтрационные свойства интрузивных пород трудно поддается учету, поскольку роль других факторов значительно более существенна. Однако имеющиеся данные указывают на повышенную проницаемость (в пределах коры выветривания) крупнокристаллических кислых пород, а также гранитоидов, образующих интрузии типа батолитов. Породы небольших интрузий (мелких лакколитов, штоков, даек), а также мелкозернистые жильные породы типа аплитов, как правило, имеют меньшую проницаемость.

Очень высокую проницаемость гранитоиды могут приобрести, как уже было отмечено выше, в зоне влияния разгрузки и других экзогенных процессов в глубоко врезанных долинах и ущельях, примером чего являются мезозойские граниты основания Колымской ГЭС, строящейся в настоящее время.

Плотина Колымской ГЭС с подпором 112 м расположена в центральной части крупного батолита, пересекаемого р. Колымой на протяжении 12 км.

По данным Ленгидропроекта при опытных фильтрационных работах в гранитах подруслового талика обнаружены участки с удельным водопоглощением, равным нескольким сотням литров в минуту, а на одном интервале даже около 1250 л/мин (соответствующая проницаемость около 2000 дарси). Высокие водопоглощения наблюдались до глубины 40—50 м, на больших глубинах проницаемость гранитов уменьшалась, на глубине около 80 м удельное водопоглощение было 10—15 л/мин. Практически непроницаемые породы на глубине 100 м еще не были достигнуты.

При бурении в талых породах наблюдались (до глубины около 40 м) провалы бурового инструмента максимум на 20—30 см по вертикали, соответствующие трещинам, частично заполненным размягченным грунтом.

В мерзлых гранитах, образующих склоны долины, при проведении горных работ и бурения также обнаружены трещины с раскрытием, лишь немного меньшим, чем в подрусловом талике, частично заполненные льдом или льдистым грунтом.

Чрезвычайно высокая проницаемость гранитов основания плотины на р. Колыме и провалы бурового инструмента объясняются наличием трещин донной разгрузки и, вероятно, также мерзлотными деформациями. Возможно, что, кроме того, под руслом происходит суффозионный вынос заполнителя трещин. Большинство интервалов с высокими водопоглощениями соответствует тектоническим нарушениям.

Высокая проницаемость гранитов и других интрузивных пород не является правилом. В большинстве районов, особенно в пределах древних кристаллических щитов и при слаборасчлененном рельефе, интрузивные породы в верхней трещиноватой зоне (исключая поверхностный разрушенный слой) имеют проницаемость, не превышающую 3—4 дарси, и на глубине порядка нескольких десятков метров становятся практически непроницаемыми.

Генезис и тип трещин	Раскрытие
Первичные трещины отдельности: литогенетические напластования интрузивных пород	Незначительное То же »
эффузивных пород	До 0,5—1 мм, иногда больше
Тектонические трещины: платформенных областей *	Небольшое или среднее
связанные со складчатостью (со- складчатые) * разлома и разрыва **	Различное, наибольшее порядка 1 мм Различное, иногда большое (до 1 м)
глубинные разломы и трещины в зонах активных магматических очагов **	Большое, местами до нескольких м
кливажа	Очень малое
Экзогенные трещины: выветривания	Большое и очень большое
бортовой разгрузки (трещины скола)	Очень большое (до 1 м)
донной разгрузки возникшие вследствие увеличения объема пород	То же Большое
оползевые	Очень большое
просадочные возникающие при высыхании гли- нистых пород на поверхности взрыва	То же » Большое, убывающее при удалении от центра взрыва
* Диаклазы [147]. ** Параклазы [147].	

Заполнение	Проводимость
<p>Обычно отсутствует Отсутствует или глинистое, редко минеральное Минеральное, преимущественно несплошное</p>	<p>Очень низкая, нередко близкая к нулю, сильно возрастает при тектонических подвижках по трещинам Небольшая, сильно возрастающая при воздействии экзогенных процессов у трещин, образующихся вследствие растягивающих и скалывающих напряжений</p>
<p>Отсутствует или частичное минеральное</p>	<p>Значительная, особенно у покровов основных пород четвертичного возраста</p>
<p>Отсутствует или несплошное, разнообразное</p>	<p>Небольшая или средняя, сильно возрастает близ поверхности, особенно в карбонатных породах</p>
<p>То же Брекчия трения, глина трения, жильные минералы</p>	<p>Довольно большая в сводах антиклиналей Различная, зависит от кинематического типа трещины, вещественного состава пород, геологического возраста дислокаций. У поверхности может стать очень высокой</p>
<p>Преимущественно минеральное, несплошное</p>	<p>У молодых или «оживившихся» разломов высокая, у древних незначительная. Минеральные и термальные источники у современных разломов</p>
<p>Отсутствует или тонкие минеральные налеты</p>	<p>Незначительная, несколько повышенная у твердых пород близ поверхности</p>
<p>Обломочный материал различной крупности может отсутствовать</p>	<p>Различная в зависимости от проницаемости заполнителя. В зоне физического выветривания может быть очень высокой</p>
<p>Отсутствует или частичное (грубообломочным материалом)</p>	<p>Чрезвычайно высокая. Трещины могут быть сгруппированы в пакки с весьма высокой проницаемостью</p>
<p>То же Отсутствует или частичное (дробленой породой)</p>	<p>Очень высокая, но обычно непостоянная Преимущественно высокая, но может уменьшаться при кристаллизации расширяющихся минералов</p>
<p>Отсутствует или разнообразный рыхлый и связанный грунт</p>	<p>Различная в зависимости от наличия заполняющего материала и его проницаемости; может быть очень высокой</p>
<p>Преимущественно отсутствует</p>	<p>Очень высокая</p>
<p>То же</p>	<p>То же</p>
<p>Преимущественно грубообломочный материал</p>	<p>Очень высокая, особенно в твердых породах, быстро уменьшающаяся при удалении от центра взрыва</p>

На Кольском полуострове и в Карелии проницаемость интрузивных пород обычно не превышает 0,5—1 дарси, и породы становятся практически непроницаемыми часто на глубине всего около 10—20 м от поверхности. Это объясняется, по-видимому, тем, что ледниковый покров сорвал здесь наиболее трещиноватые и проницаемые слои, образующие верхнюю зону.

Низкая проницаемость интрузивных пород может наблюдаться и в районах с сильно расчлененным рельефом. Примером является участок строительства плотины (подпор 45 м) Капчугайской ГЭС на р. Или.

Здесь граниты палеозойского возраста, залегающие в русле и бортах долины под маломощными насосами, а также образующие промежуточный массив, разделяющий реку на два рукава, по данным опытных фильтрационных работ, произведенных Средазгидропроектом, имеют удельное водопоглощение не более 0,5—1,0 л/мин (исключая верхнюю разрушенную зону гранитов). На глубине 15—20 м граниты уже практически непроницаемы. По-видимому, трещины в гранитах в данном случае настолько плотно сомкнуты и «залечены», что разгрузка и другие экзогенные процессы не вызвали значительного увеличения проницаемости.

Фильтрационная анизотропия у интрузивных пород непостоянна и преимущественно проявляется слабо — коэффициент анизотропии A не превышает 1 : 5—1 : 6. На многих участках интрузивные породы практически изотропны ($A \approx 1$).

II. Эффузивные породы четвертичного возраста (неовулканические), залегающие в виде покровов, характеризуются высокой проницаемостью, у основных пород достигающей десятков, а иногда и сотен дарси, что обусловлено значительной проводимостью первичных трещин отдельности, а для многих видов этих пород также кавернозностью.

Базальтовые и андезито-базальтовые покровы дают начало мощным источникам с дебитом, достигающим десятков, а иногда и сотен литров в секунду. Так, в Армении, в 40 км от Еревана, выходит источник Айгер-Лич, образующий небольшое озеро. Дебит источника был первоначально около 3 м³/сек, в настоящее время при откачке, производимой в поливной период, он увеличивается не менее чем вдвое. Источник выходит по сбросу и питается потоком подземных вод, текущих по контакту эоценовых глин и песчаников и олигоценных базальтов, а также водами четвертичных базальтов, широко развитых у подножия южного склона горы Арагац. Обильные источники из четвертичных основных эффузивных пород известны и в других районах Закавказья, Дальнего Востока и в зарубежных странах.

Проницаемость четвертичных кислых эффузивных пород изучена сравнительно слабо, но, по-видимому, она несколько меньше, чем у основных эффузивов. Однако в Армении и других районах известны источники с дебитом несколько десятков литров в секунду, выходящие из кислых эффузивов, указывающие на их значительную проницаемость.

Проницаемость дочетвертичных эффузивных пород значительно меньше, чем четвертичных, причины чего были указаны выше. По данным К. Н. Паффенгольца, в Закавказье проницаемость лав уменьшается сверху вниз — от молодых к древним, а также и внутри отдельных потоков. Так, например, олигоценые долеритовые базальты Канакерского плато в Армении являются водоупором для обильных источников из четвертичных андезито-базальтов; вода этих источников используется для водоснабжения г. Еревана.

Древние сильнодислоцированные эффузивные породы по своим фильтрационным свойствам близки к интрузивным породам.

III. Обломочные сцементированные трещиноватые породы, не заключающие сообщающихся друг с другом межзерновых пор, имеют обычно небольшую проницаемость порядка сотых и десятых долей дарси, редко 1—2 дарси. Максимальная проницаемость наблюдается у песчаников, конгломератов и других пород с большим количеством карбонатного цемента, являющихся переходными к карбонатным породам и поэтому подверженных растворению и выщелачиванию и иногда даже карстообразованию.

Повышенная проницаемость в зонах разломов имеет место также у пород данной группы, при механическом разрушении которых почти не образуется тонкодисперсного материала, заполняющего трещины, например песчаников и конгломератов с кремнистым или кварцевым цементом и т. п. Глинистые песчаники, алевролиты, песчано-глинистые сланцы обычно малопроницаемы даже в зонах тектонических нарушений.

Примером изложенного могут служить мощные песчано-глинистые или песчано-сланцевые угленосные свиты камменно-угольного и пермского возраста Донбасса и других угленосных областей.

Породы этих свит дислоцированы, пересечены рядом разломов и трещиноваты; открытая пористость незначительна или практически отсутствует. Наибольшей проницаемостью (до 10—20, редко более 50 дарси) обладают в этих свитах грубозернистые песчаники и гравелисты, меньшей — разномзернистые и среднезернистые песчаники с кремнистым или кварцевым цементом (до 1—2 дарси). Проницаемость алевролитов, глинистых песчаников, песчано-глинистых и углистых сланцев, составляющих значительную часть описываемых свит, весьма мала даже в зонах разломов. Аналогичные свиты преимущественно палеозойского возраста) распространены и в других районах.

Обломочные сцементированные трещиноватые породы вследствие слоистости и преобладания определенных систем трещин могут обладать фильтрационной анизотропией, однако редко сильно выраженной.

Уменьшение проницаемости с глубиной у данных пород обычно происходит медленно, и практически непроницаемые породы иногда залегают на глубине нескольких сотен метров (Донбасс).

IV. Карбонатные породы (известняки, доломиты, мел, мергели) в зонах аэрации и интенсивного водообмена в большинстве

случаев отличаются повышенной проницаемостью, достигающей иногда нескольких десятков дарси даже при отсутствии явных признаков карста. Это объясняется увеличением раскрытия трещин вследствие растворения пород на стенках. Впрочем установить границу между закарстованными и незакарстованными карбонатными породами трудно, так как одна и та же толща, будучи незакарстованной на одних участках, может на небольшом расстоянии от них давать явные карстопроявления (см. § 2.5).

Проницаемость незакарстованных карбонатных пород с глубиной большей частью постепенно уменьшается, на глубине порядка 200—300 м она обычно не превышает десятых и сотых долей дарси. Однако, как уже упоминалось, при наличии агрессивных вод проницаемость карбонатных пород может быть высокой даже на глубине свыше 2000 м.

Ниже приводятся два примера низкой проницаемости карбонатных пород на глубине.

1. Мощная толща известняков нижней перми, верхнего и среднего карбона в Волго-Уральской области имеет почти везде незначительную проницаемость. На территории Краснокамского нефтяного месторождения эта толща была пересечена многочисленными разведочными и эксплуатационными скважинами. На глубине от 230 до 900 м ни одна скважина не дала заметного притока воды, поглощение промывочной жидкости наблюдалось редко. Средняя проницаемость толщи оценивается приблизительно величиной порядка сотых долей дарси.

2. Известняки среднего девона, пройденные скважинами, пробуренными для сброса промышленных стоков Тамбовского химкомбината (см. § 2.1), на глубинах приблизительно от 600 до 820 м, представленные пластами мощностью в несколько десятков метров каждый, по данным каротажа и другим имеют проницаемость, близкую к нулю. Между тем песчаники и плотные пески, залегающие в том же интервале глубин, имеют проницаемость от 1,6 до 4,6 дарси.

Примеры относительно значительной проницаемости карбонатных пород на глубине, обусловленной агрессивным действием вод, поднимающихся по трещинам разлома, приведены ниже.

1. Побережье Каспийского моря в Южном Дагестане характеризуется довольно сложной тектоникой и значительной сейсмичностью. Новейшие горообразовательные депрессии, по-видимому, «оживили» крупные разломы, возникшие еще в более ранние этапы формирования Главного Кавказского хребта. По этим разломам поднимаются минерализованные термальные воды с высоким газовым фактором, агрессивные по отношению к известнякам и мергелям, так как газы, в основном состоящие из метана, содержат довольно большое количество углекислоты.

Известняки верхнего мела и мергели хадумского горизонта палеогена, вскрытые многочисленными разведочными и эксплуатационными скважинами на газ и нефть, дали исключительно высокие водопритоки самоизливом, особенно в начальный период, когда выделение газа было наиболее интенсивным и образование естественного газлифта сильнее всего влияло на дебит скважины.

Одной из наиболее детально изученных газонесных структур на побережье является Бернкейская, где в 1962 г. производились разведка на промышленные воды и предварительная оценка их эксплуатационных запасов.

На участке этой структуры верхнемеловые известняки залегают на глубине в среднем от 750 до 1150 м. Мощность их более 400 м.

Наиболее детально исследованная скважина вскрыла большую часть толщи известняков верхнего мела и фонтанировала с начальным дебитом около 7000 м³/сутки, постепенно уменьшавшимся вследствие понижения газового фактора. Установившийся дебит скважины был 2750 м³/сутки при газовом факторе в среднем 3 м³/м³.

Расчет средней проницаемости известняков верхнемеловой толщи дает величину ее около 0,045 дарси. Однако данные каротажа и общие представления о геологическом строении района позволяют заключить, что приток воды и газа происходил неравномерно и был приурочен к ряду трещиноватых зон и крупных проводящих трещин. Если считать, что высокопроницаемая часть верхнемеловой толщи составляет 5% ее мощности, то проницаемость известняков в этих зонах получается в 20 раз большей, т. е. равной 0,9 дарси, что ближе к действительности, чем проницаемость, указанная выше.

2. В области Передовых хребтов восточной части Северного Кавказа ряд глубоких скважин также фонтанировал с весьма высоким дебитом из известняков верхнего мела. Особенно высокий начальный дебит термальной минеральной воды около 40 000 м³/сутки с большим газовым фактором был получен из одной скважины в районе сел. Датых (Северная Осетия), вскрывшей верхнемеловые известняки на глубине от 895 до 995 м (полная мощность толщи известняков не вскрыта).

3. Примером довольно высокой проницаемости карбонатных пород на глубинах до нескольких сотен метров, обусловленной агрессивными водами другого происхождения, являются слои известняков мощностью всего несколько метров, залегающие в подчиненном количестве среди песчано-сланцевых пород угленосных свит Донбасса на глубинах до нескольких сотен метров. Проницаемость этих известняков достигает иногда нескольких десятков дарси; местами они закарстованы. Агрессивные воды в данном случае, по-видимому, образуются за счет окисления серного колчедана и, возможно, также углистых прослоев водами, содержащими кислород, проникающими по трещинам с поверхности.

V. **Метаморфические породы** весьма разнообразны по петрографическому составу, структуре и фильтрационным свойствам.

1. Гнейсы и более основные кристаллические сланцы имеют проницаемость того же порядка, что и интрузивные породы, и подчинены близким к ним закономерностям — зависимости проницаемости от глубины и влиянию на нее разгрузки, выветривания и других экзогенных процессов. Но у кристаллических сланцев хорошо выражена фильтрационная анизотропия, значительно более интенсивная и постоянная, чем у интрузивных пород, и соответствующая слоистости и кливажу (если исключить участие тектонических нарушений).

В зоне разгрузки кристаллические сланцы на участках тектонических нарушений могут приобрести весьма высокую проницаемость того же порядка, что и у интрузивных пород.

Примером этого являются породы основания сооружений Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисее (подпор 225 м), представляющие собой орто- и парасланцы, по петрографическому составу близкие к диабазам.

Сланцы прорваны многочисленными дайками преимущественно основных магматических пород и подвержены кроме регионального интенсивному контактовому метаморфизму. Они являются прочными скальными

породами и пересечены рядом тектонических нарушений, представляющих собой зоны интенсивной трещиноватости и брекчий трения, проходящие часто по контактам с магматическими породами.

По данным опытных фильтрационных работ, произведенных Гидропроектom, проницаемость пород, образующих основание Саяно-Шушенской ГЭС, весьма непостоянна, в среднем в пределах изученной зоны в русле глубиной около 130 м от поверхности приблизительно равна нескольким дарси. Практически непроницаемые породы залегают в бортах на глубине около 100 м, а в русле на глубине более 130 м петрографический состав пород заметно не влияет на их проницаемость.

Локальные повышения проницаемости до 300—400 дарси соответствуют зонам интенсивной трещиноватости, частично приуроченным к контактам различных пород, в том числе магматических. При значительном развитии пологопадающих и горизонтальных трещин у основания склонов долины, по-видимому, в них образовались трещины донной разгрузки, с которыми и связана локальная весьма высокая проницаемость кристаллических сланцев.

На Кольском полуострове и в Карелии, а также на территории других древних щитов массивы древних кристаллических сланцев, так же как и интрузивные породы и по тем же причинам, имеют невысокую проницаемость и на небольшой глубине становятся практически непроницаемыми.

2. Хлоритовые, эпидотовые, серицитовые сланцы, филлиты и другие метаморфические полускарпальные породы, разрушающиеся с образованием значительного количества глинистого материала, слабопроницаемы даже у поверхности и в зонах разломов, а с глубины 10—20 м обычно практически непроницаемы.

3. Метаморфические породы, состоящие главным образом из кварца или аморфного и водного кремнезема, кварциты, кремнистые сланцы, роговики и т. п. обычно практически непроницаемы. Однако на участках интенсивной тектонической трещиноватости в зонах крупных разломов, а также в верхней разрушенной зоне они могут приобрести более или менее значительную проницаемость, быстро уменьшающуюся при переходе к ненарушенным породам.

4. Карбонатные метаморфические породы (мраморы, известковые сланцы и т. п.) отличаются от карбонатных неметаморфизованных пород меньшей проницаемостью и более быстрым уменьшением ее с глубиной. В зонах разломов и интенсивной трещиноватости, а также в поверхностном разрушенном слое эти породы также подвержены растворению, и местами в них может развиваться карст. Однако соответствующие проницаемые зоны расположены обычно на значительном расстоянии друг от друга.

VI. Каменные угли относятся к слабопроницаемым трещиноватым породам. Проницаемость 0,1—1 дарси свойственна антрацитам и тощим углям. Однако трещинная пустотность таких углей не свыше 0,5—1%.

Бурые угли, бокхеды и горючие сланцы имеют разную проницаемость (10^{-4} —20 дарси), но пористость их выше (до 15—30%), однако она соответствует мелким порам.

§ 2.5. Проницаемость и пустотность закарстованных и кавернозных пород

Проницаемость закарстованных пород (в массиве) может быть очень высокой; из закарстованных пород возможны очень большие, иногда катастрофические, притоки и прорывы воды в горные выработки; с ними связаны весьма большие потери воды на фильтрацию в основании плотин и из водохранилищ, значительная производительность буровых скважин и т. д. Вместе с тем проницаемость закарстованных пород, как известно, очень непостоянна.

Изучение закарстованных пород имеет существенное практическое значение. Карсту посвящена обширная литература [37, 80, 99, 140]*. Ниже приводятся только краткие сведения о проницаемости и пустотности различных закарстованных пород и соответствующих закономерностях.

I. Проницаемость закарстованных пород может достигать тысяч дарси (если рассматривать достаточно большие массивы; см. § 1.2) и зависит преимущественно от размеров поперечного сечения карстовых каналов в самых узких местах.

Пустотность закарстованных пород (коэффициент открытой закарстованности) изменяется в пределах от 2 до 10—15%, но чаще всего равна 3—5%.

II. Наибольшая закарстованность и проницаемость карстующихся пород наблюдаются в зоне аэрации в верхней части зоны интенсивного водообмена. С глубиной степень закарстованности и проницаемость, как правило, уменьшается, но неодинаково в различных условиях, так как развитие карста зависит от многих факторов: литологии, вещественного состава и трещиноватости карстующихся пород, условий их залегания, а также рельефа и климата района.

При соответствующих условиях, например при наличии агрессивных вод, карст может развиваться и на значительной глубине (см. выше).

III. Движение воды в закарстованных породах может быть турбулентным вследствие значительного поперечного сечения карстовых каналов; турбулентное движение почти всегда возникает на водопримной поверхности скважин и других водозаборов, а также горных выработок и древажей, но при очень большом поперечном сечении карстовых каналов может наблюдаться и у естественных потоков подземных вод (подробнее данный вопрос освещен во второй части книги, см. § 3.4).

IV. Особенности карстообразования и характер карста у различных пород следующие.

1. Карст в карбонатных породах (известняках, доломитах, меле, мергелях) хорошо изучен, вследствие их широкого распространения. Закарстованность карбонатных пород наблюдается

* Ссылки даются только на главные обобщающие работы.

очень часто, несмотря на их небольшую растворимость в природных водах. При этом карстовые каналы в известняках нередко имеют протяжение в несколько километров и распространяются обычно на большую глубину, чем у значительно более растворимых пород (гипса, ангидрита и тем более галоидных солей). Главная причина этого — восстановление агрессивности карстовых вод на пути их движения (см. § 1.2).

При значительной скорости движения воды в зияющих трещинах и карстовых каналах, а также при содержании в воде взвешенных частиц (преимущественно мелкого песка) наряду с растворением может возникать подземная эрозия, ускоряющая карстообразование и почти не затухающая на пути движения воды. На этот процесс еще в 1930 г. обратил внимание К. Терцаги [147].

В карбонатных породах некоторых областей наблюдается палеокарст, возникший в далекие геологические периоды при нахождении закарстованных пород у поверхности в зоне аэрации или интенсивного водообмена и после опускания этих пород на глубину и покрытия их более молодыми осадками, представляющий собой полости, лишь частично заполненные рыхлым материалом или минеральными образованиями. Необходимым условием для наличия палеокарста являются значительные размеры карстовых полостей.

Проницаемость палеокарстовых карбонатных пород значительно меньше, чем у закарстованных пород, залегающих в настоящее время около поверхности. Это вызвано слабой гидравлической связью между карстовыми полостями, так как соединяющие их проводящие каналы частично заполнены и в самых узких местах имеют незначительное поперечное сечение.

Палеокарст обнаружен глубоким бурением в верхнедевонских известняках Волго-Уральской области на глубине до 2000 м.

Хорошим примером гидрогеологических условий палеокарстовых пород являются данные бурения и исследования двух эксплуатационных скважин на промышленные воды в районе Краснокамска (Пермская область). Первая скважина вскрыла на глубине 1750 м небольшую карстовую полость в известняках франкского яруса девона, а в течение нескольких лет эксплуатации имела устойчивый дебит 2500—2650 м³/сутки при понижении уровня 180—190 м. Исследование этой скважины показало, что проницаемость закарстованных пород мощностью 10 м равна ~5 дарси при мощности всей толщи известняков около 180 м. После остановки скважины на капитальный ремонт возле нее была пробурена вторая скважина, которая не встретила карстовых полостей и дала лишь незначительный дебит.

Развитие карста в карбонатных породах зависит от содержания в них нерастворимых примесей и наличия прослоев некарстующихся пород. Легче всего карст возникает в чистых известняках, состоящих почти нацело из углекислого кальция. Доломиты подвержены карстообразованию в меньшей степени, чем

известняки, что, по-видимому, объясняется образованием при их растворении доломитовой муки, препятствующей свободному движению воды по трещинам и узким каналам.

В мелу карстопроявления сравнительно редки, что обусловлено его рыхлой структурой и пористостью, вследствие чего потеря водой агрессивности при фильтрации через мел и меловые мергели происходит очень быстро. Кроме того, рыхлые продукты разрушения мела препятствуют интенсивному движению воды по трещинам.

Мергели и глинистые известняки по той же причине также слабо подвержены карстообразованию.

Слабо развивается карст также в толщах известняков с мергелистыми и глинистыми прослоями. Примером этого являются слоистые и плитчатые верхнемеловые известняки Дагестана, о которых уже упоминалось выше. На обширной площади на пологих северных склонах хребтов Салатау и Гимрийского, а также в пологой сводовой части Хадумской антиклинали карстопроявления в известняках почти отсутствуют, хотя на других участках имеются крупные карстовые полости (см. ниже).

2. Зависимость карстообразования от тектонической нарушенности и трещиноватости пород общеизвестна. Как было указано выше (см. § 1.2), одна и та же толща на участках спокойного залегания может быть незакарстованной, а в местах интенсивных дислокаций иметь карстовые полости.

Это иллюстрируется примером на рис. 2.2.

Толща верхнемеловых известняков мощностью от 380 до 400 м в Северном

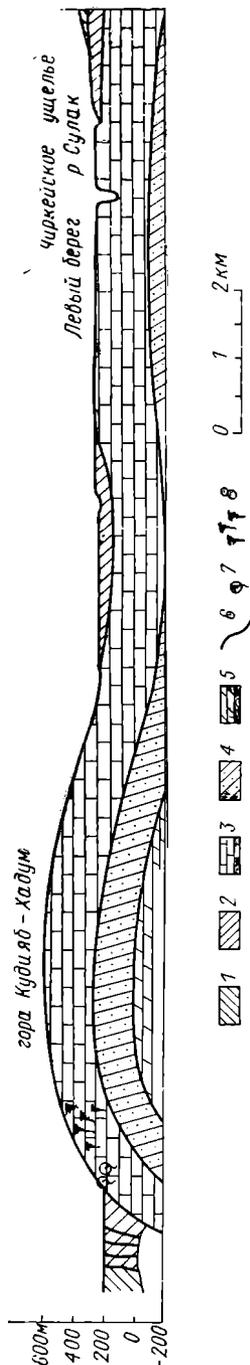


Рис. 2.2.

Схематический геолого-литологический профиль через Хадумское поднятие (Дагестан).

1 — глинисто-мергелистые породы нижней части майкопской свиты; 2 — пестроцветные мергели фораминиферовой толщи; 3 — толща известняков верхнего мела; 4 — преимущественно песчано-глинистые породы основной части нижнемеловой толщи; 5 — доломиты, известняки и глины валаджинского яруса и верхней юры; 6 — крупные разломы; 7 — источники; 8 — закарстованность.

Дагестане образует Хадумское антиклинальное поднятие с пологим сводом и северо-западным крылом (угол падения 9—10°) и крутым северо-восточным (угол падения 45—55°), осложненным мелкой вторичной складчатостью и флексурами и пересеченным рядом крупных трещин разрыва (типа сбросо-сдвига). На пологом западном крыле складки р. Сулак образует глубокое Чиркейское ущелье, где строится высотная плотина (см. § 1.3). В районе Чиркейского ущелья не обнаружено карстопроявлений. Проницаемость известняков, установленная в результате проведения большого объема опытных фильтрационных работ, изменяется здесь в пределах от нуля до нескольких дарси, в среднем равна 0,65 дарси. С глубины 40—50 м от поверхности известняки практически непроницаемы. В ущелье наблюдались только два значительных источника, выходящих по трещинам сбросо-сдвига, с дебитом 40—45 и 10—12 л/сек. Оба источника имели постоянный режим, не характерный для карстовых вод.

В Миатлинском ущелье, расположенном на 15 км ниже по течению р. Сулак, прорезающей крутое нарушенное крыло Хадумского поднятия, при исследованиях * в 1965 г. горными выработками вскрыты крупные карстовые полости. У уреза воды выходит несколько обильных источников; дебит наибольшего из них около 300 л/сек. Карстовые полости и источники приурочены к крупным трещинам сбросо-сдвига и флексуорообразным изгибам известняков.

Удельное водопоглощение при опытных нагнетаниях достигало в Миатлинском ущелье более 300 л/мин, а средняя проницаемость известняков (весьма неравномерная) 100—200 дарси, т. е. почти в 100 раз больше, чем в Чиркейском ущелье, при той же литологии верхнемеловой толщи.

Из-за наличия карста створ плотины (с подбором 50 м), строительство которой намечалось первоначально в Миатлинском ущелье, перенесен выше по течению на участок, сложенный слабопроницаемыми нижнемеловыми породами, представленными преимущественно песчаниками.

3. Гипсы и сильно гипсоносные породы в зоне аэрации обычно интенсивно закарстованы и имеют очень высокую, но неравномерную проницаемость. Ниже уровня подземных вод закарстованность гипса быстро уменьшается, и на глубине нескольких десятков метров от этого уровня гипсы, как правило, становятся непроницаемыми. Это объясняется не только прекращением растворения при насыщении воды сернокислым кальцием, но также известной пластичностью гипса, вследствие которой трещины в нем смыкаются при сравнительно небольшом геостатическом давлении. В виде исключения гипсы характеризуются карстопроявлениями и высокой проницаемостью и на значительной глубине, если залежи гипса подстилаются пластами, заключающими напорную воду, далекую от насыщения сернокислым кальцием, а также в зонах разломов, по которым поднимаются подобные воды.

4. Толщи ангидрита представляют собой компактные непроницаемые породы. Появление в них проводящих трещин, а затем также карстовых полостей и возникновение проницаемости, часто значительной, происходят в процессе гидратации вследствие образования трещин в верхней части толщи и в покрывающих ее породах, вызванного увеличением объема при переходе ангидрита в гипс.

5. Галоидные соли (каменная соль, калийные и калийно-магниевые соли, сульфаты магния и др.) вследствие своей высокой

* Сведения получены от старшего инженера-гидрогеолога института Ленгидропроект А. В. Трубачевой.

растворимости и пластичности имеют те же особенности, что и гипсы, но выраженные значительно более резко.

Из-за значительной пластичности галоидных солей трещины и пустоты в них замыкаются уже при небольшом геостатическом давлении, примерно соответствующем глубине 100—200 м. Поэтому не затронутые карстом соли представляют собой совершенно непроницаемые породы, имеющие лишь замкнутые поры и иногда полости, заполненные газом, находящимся часто под давлением выше атмосферного.

Соляной карст наиболее интенсивно развивается в зоне аэрации. Соляные купола, возвышающиеся над местным базисом денудации, характеризуются обычно карстопроявлениями большого масштаба, заключающимися в образовании многочисленных полостей и пещер часто очень больших размеров, соединенных широкими ходами; появляются также карстовые воронки, в том числе провалы, различных размеров и формы. Проницаемость закарстованных солей в данном случае столь велика, что не поддается определению, а соли растворяются с такой скоростью, что во время ливней быстро увеличиваются размеры полостей, меняется их форма, происходят провалы и т. п.

Соляные тела, выходящие на поверхность, разрушаются так быстро, что они могут сохраниться лишь в условиях сухого климата, когда скорость поднятия их равна или выше скорости разрушения.

Типичными примерами закарстованных соляных куполов являются горы Ходжа-Мумын и Ходжа-Сартис в Кулябской области Южного Таджикистана [80]. Аналогичные закарстованные соляные купола имеются на междуречье Урала и Эмбы, в Иране, Калифорнии, Австралии и других зарубежных странах.

В областях избыточного увлажнения ископаемые соли залегают на глубине не менее нескольких десятков метров обычно под слабопроницаемыми породами. Соляной карст в этих условиях развивается в маломощной верхней зоне солей, а также в гипсовой или гипсово-глинистой шляпе, состоящей из гипса и нерастворимого остатка, соляных залежей. При преобладании гипса глинисто-гипсовая шляпа сильно закарстована и имеет очень высокую проницаемость. Так, на Индерском соляном куполе по данным исследований Всесоюзного научно-исследовательского института галургии [122] проницаемость гипсово-глинистой шляпы достигала 1500 дарси.

При большом количестве глинистого материала глинисто-гипсовая шляпа имеет невысокую проницаемость, обычно сильно возрастающую на контакте с солями, где образуется горизонт контактных рассолов, представляющий собой единое целое с маломощной зоной закарстованных солей. Проницаемость пород в зоне контактных рассолов разнообразна и очень неравномерна.

Так, например, в районе г. Калуга в Прикарпатье на Домбровском участке, где разрабатываются калийные соли открытым способом, проницаемость пород в контактовой зоне преимущественно равна одной-двум

десятым долям дарси, а в пониженных участках кровли солей еще меньше на два-три порядка. И только на немногочисленных возвышенных участках кровли солей проницаемость пород в зоне контактных рассолов повышается примерно до 20—25 дарси из-за карстообразования. Глубина залегания солей на Домбровском участке около 50 м.

На территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей горизонт контактных рассолов весьма непостоянен. На возвышенных участках кровли соляной залежи при глубине несколько десятков метров от поверхности этот горизонт хорошо выражен и характеризуется полостями высотой до нескольких сантиметров по вертикали [124], заполненными концентрированными рассолами или взвесью глинистых частиц в рассоле. Проницаемость трещиноватой и местами закарстованной зоны мощностью до 0,5—1 м здесь достигает приблизительно 10—20 дарси. В понижениях кровли соляной залежи горизонт контактных рассолов отсутствует. Проницаемость верхних слоев этой залежи практически равна нулю, а покрывающие ее глинисто-мергелистые породы с прожилками гипса и солей имеют проницаемость, близкую к нулю.

На Старобинском месторождении солей (г. Солигорск в Белоруссии) при глубине залегания кровли соляной залежи в несколько сотен метров горизонт контактных рассолов отсутствует и проницаемость пород в зоне контакта также близка к нулю.

В отдельных случаях карст захватывает всю толщу ископаемых солей, что может быть связано с разломами, пересекающими соляную залежь, по которым из водоносных горизонтов, залегающих глубже основания соляной залежи, поднимаются напорные воды, агрессивные по отношению к солям. Такие условия, по-видимому, имеют место у восточной границы Верхнекамского месторождения солей.

Кавернозные породы имеют довольно высокую пустотность (до 10—15, редко 20%), проницаемость обычно меньшую, чем у закарстованных пород. Это объясняется преимущественно узкими ходами или трещинами с небольшой проводимостью, соединяющими каверны между собой; часть каверн вообще может быть замкнутой. Карстовые полости иногда также называют кавернами. Автор уже рекомендует именовать кавернами только полости, образовавшиеся вследствие других процессов, например обменных реакций (у доломитов), выделения газов (у эффузивных пород) и т. д.

Кавернозность наблюдается у карбонатных пород (преимущественно у доломитов, реже у известняков) и молодых эффузивов.

Каверны в доломитах и доломитизированных известняках имеют размеры от долей сантиметра до метра и более, пустотность этих пород может достигать 10—15%, но проницаемость обычно не более 20, редко достигает 40—50 дарси (если дополнительно не возникли карстовые полости) и быстро снижается на глубине.

К кавернозным породам можно отнести также раковинные и детритусовые известняки неогенового и четвертичного возраста, имеющие широкое распространение на юге европейской части СССР (у более древних раковинных известняков пустоты заполняются кальцитом или становятся замкнутыми из-за сжатия пород геостатическим давлением). Пустотность раковинных и

детритусовых известняков достигает 10—15% (иногда больше), а проницаемость их очень разнообразна.

В береговых примыканиях плотины Каховской ГЭС проницаемость верхнесарматских раковинных известняков изменялась в пределах от нескольких до многих сотен дарси; причем высокие значения проницаемости наблюдались в зонах, где имело место интенсивное карстообразование [38].

Кавернозность эффузивных пород очень характерна для базальтов и андезито-базальтов, у которых каверны имеют размеры от долей миллиметра до метра и более в поперечнике, причем покровы основных эффузивных пород со значительной кавернозностью часто сменяются плотными компактными породами. Пустотность основных неовулканических пород может достигать 15—25%. Кислые эффузивные породы обычно имеют меньшую кавернозность, чем основные; для них характерны крупные, но редкие каверны.

Влияние кавернозности на проницаемость молодых эффузивов, по-видимому, существенно, но трудно поддается определению вследствие такого же или еще большего влияния проводимости первичных трещин отдельности.

У эффузивных пород дочетвертичного возраста мелкие каверны заполняются различными минералами, вследствие чего образуются мандельштейны, крупные же каверны становятся изолированными или слабо сообщающимися друг с другом. Поэтому, а также из-за заполнения минеральными новообразованиями трещин отдельности (см. выше) древние кавернозные эффузивы слабопроницаемы!

§ 2.6. Классификация горных пород по фильтрационным свойствам

В табл. 2.3 собраны данные о фильтрационных свойствах горных пород, приведенные выше. Таблица составлена на основе классификации горных пород по водопроницаемости, предложенной Н. А. Плотниковым [144, табл. II-4]. Классификация нами детализирована: выделены основные генетические типы и виды пород; для каждого вида пород кроме характерных значений проницаемости указана пустотность, приведены краткие сведения о степени постоянства фильтрационных свойств, основных закономерностях их изменения в пространстве, фильтрационной анизотропии и т. д.

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ОБЩИМ ГЕОЛОГИЧЕСКИМ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Значение приближенной оценки фильтрационных свойств горных пород, предшествующей проведению опытных гидрогеологических работ, было указано выше (см. § 1.1).

Группа	Характеристика проницаемости пород	Основные виды пород	Коэффициент проницаемости, дарс
I	Очень высокая	1. Галечники и гравий без заполнителя (промытые) 2. Глыбы и щебень в осыпях и обвалах без заполнителя 3. Спльнзокарстованные 4. Неовулканические, преимущественно базальты, андезито-базальты и андезиты 5. Сильнотрециноватые интрузивные, гнейсы и кристаллические сланцы	> 500 (500—5000) > 500 (500—10000) > 100 (100—5000) 100—2000 > 100 иногда до 1500
II	Высокая	1. Галечники и гравий с заполнителем — разномерным песком; песчано-галечные отложения, грубозернистые пески 2. Чистые разно- и среднезернистые пески 3. Закарстованные 4. Трециноватые магматические (интрузивные и древние эффузивные), гнейсы и кристаллические сланцы 5. Кавернозные доломиты и известняки	20—100 10—80 10—100 10—50 10—100
III	Средняя	1. Галечники и гравий с заполнителем — мелко- и среднезернистым песком 2. Пески мелко- и среднезернистые 3. Пористые сцементированные (песчаники, гравелиты, конгломераты и т. п.) 4. Слабокарстованные и палеокарстовые 5. Трециноватые интрузивные, древние эффузивные и метаморфические со средней интенсивностью трециноватости 6. Трециноватые обломочные сцементированные	1—10 1—10 1—10 1—10 1—10
IV	Низкая	1. Пески тонкозернистые, пылеватые и глинистые, легкие супсп 2. Пористые, сцементированные (алевролиты, песчаники и т. п.)	0,1—1,0 0,1—1,0

* Присвоенные градации проницаемости горных пород не совпадают с принятыми соответствующая гр. III данной таблицы.

** Для пресной воды при температуре 10°С значения коэффициента фильтрации

Таблица 2.3

главнейших горных пород (по Н. А. Плотникову с дополнениями автора)*

Коэффициент фильтрации ** м/сутки	Пустотность (пористость), %	Основные закономерности фильтрационных свойств
>350 (350—3500)	25—35	Проницаемость на площади распространения довольно постоянная
>350 (350—6500)	20—35	Проницаемость постоянная
>70 (70—3500)	2—15	Проницаемость очень непостоянная и обычно уменьшается с глубиной
70—1300	2—25	Проницаемость обусловлена первичными трещинами отдельности и нередко также кавернозностью; довольно постоянная в плане и разрезе
>70 иногда до 1000	1—5	Проницаемость очень непостоянная, достигает максимума в зоне разгрузки, а также в зонах молодых разломов, быстро уменьшается с глубиной; гнейсы и кристаллические сланцы имеют хорошо выраженную фильтрационную анизотропию
15—70	25—35	Проницаемость непостоянная, часто имеет место слоистость и фильтрационная анизотропия
7,0—55	25—35	То же
7,0—70	1—8	Проницаемость очень непостоянная, уменьшается с глубиной
7,0—35	0,5—2,0	Аналогичны закономерностям пород гр. I, п. 5; на глубине проницаемость низкая
7,0—70	2—20	Проницаемость непостоянная, уменьшается с глубиной
0,7—7,0	25—30	Проницаемость непостоянная; у слоистых отложений фильтрационная анизотропия
0,7—7,0	25—40	То же
0,7—7,0	6—20	Проницаемость часто довольно постоянная; возможна фильтрационная анизотропия
0,7—7,0	0,5—1,0	Проницаемость очень непостоянная, особенно у палеокарстовых пород
0,7—7,0	0,2—0,5	Аналогичны закономерностям пород гр. II, п. 4
0,7—7,0	0,2—2,0	Проницаемость непостоянная, уменьшается на глубине; у слоистых толщ фильтрационная анизотропия
0,07—0,7	25—40	Аналогичны закономерностям пород гр. III, п. 2
0,07—0,7	5—20	Аналогичны закономерностям пород гр. III, п. 3

Для коллекторов нефти и газа, у которых весьма высокой проницаемостью считается округлены.

Группа	Характеристика проницаемости пород	Основные виды пород	Коэффициент проницаемости, дарси
IV	Низкая	3. Слаботрещиноватые магматические, метаморфические и осадочные	0,1—1,0
		4. Антрацит и сухие каменные угли	0,1—1,0
		5. Слаборазложившийся торф	0,1—1,0
		6. Лёсс и лёссовидные суглинки	0,1—1,0
V	Весьма низкая	1. Суглинки, тяжелые супеси	0,01—0,1
		2. Сланцы песчано-глинистые, хлоритовые, горючие и др.; филлиты	0,01—0,1
		3. Плотносцементированные обломочные с небольшой пористостью (алевролиты, песчаники, песчаные сланцы и т. п.)	0,01—0,1
		4. Различные очень слаботрещиноватые	0,01—0,1
		5. Хорошо разложившийся торф	0,01—0,1
VI	Близкая к нулю	1. Глины, мергелистые глины, аргиллиты, тяжелые суглинки	< 0,01
		2. Галлоидные соли, гипс, ангидрит глубже верхней трещиноватой и закарстованной зоны	Около нуля
		3. Различные скальные и полускальные глубже верхней трещиноватой зоны	< 0,01

* Для пресной воды при температуре 10°С значения коэффициента фильтрации

Основные виды работ для такой оценки следующие:

1) комплексная геологическая и гидрогеологическая съемка, сопровождаемая разведочными работами и лабораторными определениями. Для глубоко залегающих пород, кроме того, обобщение данных документации глубоких скважин или проведение таких скважин;

2) геофизические работы;

3) сбор и обобщение данных о водопритоках в различные выработки, производительности скважин и дебите источников;

4) оценка фильтрационных свойств по аналогии с другими районами.

Коэффициент фильтрации *, м/сутки	Пустотность (пористость), %	Основные закономерности фильтрационных свойств
0,07—0,7	0,1—1,0	Проницаемость непостоянная, на небольшой глубине уменьшается почти до нуля
0,07—0,7	0,1—1,0	Возможна небольшая фильтрационная анизотропия
0,07—0,7	50—70	Весьма высокая влагоемкость; наблюдается довольно высокий начальный градиент
0,007—0,07	25—50	Макропористость, фильтрационная анизотропия; проницаемость часто довольно постоянная
0,007—0,07	25—50	Проницаемость может быть довольно постоянной на площади распространения
0,007—0,07	2—4	Фильтрационная анизотропия, часто значительная; проницаемость с глубиной быстро уменьшается почти до нуля
0,007—0,07	8—10	Аналогичны закономерностям пород гр. IV, п. 2
0,007—0,07	0,01—0,1	Проницаемость уменьшается почти до нуля на очень небольшой глубине
0,007—0,07	100—150 и более	Очень большая влагоемкость, высокий начальный градиент
<0,005	15—45	Проницаемость часто непостоянная в направлении, нормальном к напластованию
Около нуля	Около нуля	Проницаемость становится равной нулю вследствие смыкания трещин и других пустот под влиянием геостатического или тектонического давления
<0,005	<0,01	Аналогичны закономерностям пород гр. V, п. 4

округлены.

§ 2.7. Данные комплексной геологической и гидрогеологической съемки, разведочных работ и лабораторных определений

Комплексная съемка является необходимой основой гидрогеологических исследований различного назначения. Ее проведение обязательно и при изучении фильтрационных свойств горных пород, причем рекомендуется охватить съемкой масштаба от 1 : 50 000 до 1 : 200 000 (в зависимости от сложности геологического строения и гидрогеологических условий) площадь примерно от 25 до 100 км², распространяющуюся вокруг объектов

исследований. На участке, где намечается бурение опытных гидрогеологических скважин, необходимо произвести более детальную съемку в масштабе от 1 : 2 000 до 1 : 10 000.

Методика комплексной съемки, а также объем фактического материала, мелких разведочных выработок и лабораторных работ, необходимые для ее обоснования при различных масштабах съемки и степени сложности района, описаны в различных руководствах [144]. Поэтому автор ограничивается приведенными ниже основными сведениями об элементах работы, наиболее существенных для оценки фильтрационных свойств горных пород.

1. Визуальная оценка проницаемости производится для рыхлых пород и дает при малом содержании в них дисперсного материала (глинистых и пылеватых частиц) удовлетворительные результаты.

Для характеристики песков рекомендуется иметь эталонные образцы с известной проницаемостью и также пользоваться таблицей-графиком М. М. Васильевского для приближенного представления о гранулометрическом составе [103]. Визуальная оценка проницаемости рыхлых пород дает возможность также судить об изменении проницаемости в различных направлениях, а для слоистых пород о наличии фильтрационной анизотропии и о том, насколько она значительна.

Менее надежные результаты дает визуальная оценка для связанных пород, особенно для макропористых и обладающих комковатой структурой, а также очень неоднородных, как, например, глинистый делювий и пролювий.

2. Определения проницаемости на основании гранулометрического состава производятся для бесструктурных несцементированных пород, что дает несколько лучшие результаты, чем визуальная оценка. Однако необходимо учитывать, что все формулы *, служащие для этой цели, несовершенны, даже наиболее обоснованные из них, как, например, формула Козени. Для структурных пород они непригодны, а для слоистых занижают результаты.

3. Лабораторные определения проницаемости дают наиболее надежные результаты для несцементированных пород. В полевых условиях можно пользоваться простейшими приспособлениями, например трубкой Каменского.

Очень удобна трубка Спецгео [145], позволяющая определять проницаемость при установившемся движении и для образцов ненарушенной структуры. Последнее имеет большое значение для слоистых и макропористых пород, а также для грунтов с комковатой структурой.

Лучше всего производить отбор образцов с практически ненарушенной структурой из шурфов (выше уровня грунтовых вод),

* Формулы для расчета коэффициента фильтрации по гранулометрическому составу имеются во всех руководствах и учебниках по гидрогеологии и инженерной геологии, например [145].

что может быть произведено режущим цилиндром, причем отбор образцов в заданном направлении в данном случае дает возможность количественно оценить фильтрационную анизотропию слоистых пород.

Значительно сложнее отбор образцов рыхлых пород с ненарушенной структурой из слоев, находящихся ниже уровня грунтовых вод, а также из буровых скважин. Однако в настоящее время имеется несколько более или менее удовлетворительных конструкций грунтоносов, служащих для этой цели [145].

Для скважин роторного и турбинного бурения, предназначенных для изучения глубоко залегающих водоносных горизонтов, применяются колонковое долото и боковой стреляющий грунтонос [83, 145].

Простота и надежность простейших лабораторных определений проницаемости не исключает необходимости в определениях гранулометрического состава, так как они дают более полное представление о литологии изучаемых горизонтов и позволяют судить о фильтрационной устойчивости пород. Кроме того, данные гранулометрического состава необходимы для подбора фильтров скважин различного назначения, в том числе опытных и наблюдательных (см. § 8.3).

Для правильной интерпретации данных лабораторных определений проницаемости и пористости необходимо обеспечение представительности отбираемых образцов, число и пункты отбора которых должны соответствовать литологическому разрезу и степени постоянства исследуемого горизонта. Очевидно, что для выполнения данного требования необходима тщательная и детальная документация всех разведочных выработок, подробное описание обнажений, а при непостоянном разрезе составление в полевой период геолого-литологических профилей различного направления. К сожалению, в практике некоторых проектно-изыскательских организаций данному вопросу не всегда уделяется необходимое внимание и при исследованиях ограничиваются взятием небольшого числа случайных образцов без удовлетворительного обоснования пунктов их отбора.

4. Предварительная оценка фильтрационных свойств пористых обломочных сцементированных пород по визуальным признакам затруднительна, поэтому для получения удовлетворительных данных приходится основываться на данных лабораторных определений и геофизических работ, а при наличии буровых скважин — на данных каротажа.

Лабораторные определения проницаемости в данном случае производятся на приборах стационарного типа. Определения для этих пород значительно более сложны и трудоемки *, чем для рыхлых, число их ограничено, и представительность отбираемых

* Для слабопроницаемых пород обычно применяется наиболее правильный метод — определение газопроницаемости с последующим расчетом коэффициента проницаемости.

образцов имеет очень большое значение; поэтому при бурении необходим сплошной отбор керна и тщательное его описание.

Однако нередко даже при тщательном и обоснованном отборе образцов из буровых скважин лабораторные определения пористости и проницаемости дают заниженные результаты вследствие того, что наиболее проницаемые слои бывают обычно менее прочно цементированными и разрушаются при бурении.

Влияние трещиноватости на проницаемость также нередко слабо отражается лабораторными определениями, так как незаполненным трещинам со значительным раскрытием и высокой проводимостью соответствуют перерывы в керне.

Изложенное подчеркивает большое значение каротажных работ для предварительного суждения о фильтрационных свойствах цементированных пород.

§ 2.8. Применение геофизических работ

В стадии предварительных исследований геофизические работы имеют значение для изучения фильтрационных свойств преимущественно трещиноватых и закарстованных горных пород и заключаются в следующем.

1. Для района, окружающего исследуемые объекты, проводимые в комплексе с гидрогеологической съемкой масштаба 1 : 50 000 — 1 : 200 000 геофизические работы позволяют уточнить литологический разрез и установить мощность изучаемых пластов или верхней наиболее трещиноватой зоны скальных пород, а для закарстованных пород — глубину распространения карстовых полостей. Кроме того, геофизические работы дают возможность обнаружить и нанести на карту участки повышений трещиноватости и закарстованности, связанные с тектоническими нарушениями, выветриванием и т. д., а иногда составить карты с показанием различных градаций трещиноватости или закарстованности пород, что дает возможность судить о возможных изменениях их проницаемости.

Для решения этих задач применяются различные геофизические методы разведки, но главное значение имеют электроразведка, измерение естественных потенциалов и сейсмические.

2. Для участков, намечаемых для расположения опытных скважин и кустов, геофизические работы проводятся в едином комплексе с геологической и гидрогеологической съемкой масштаба 1 : 2000—1 : 10 000 (см. выше).

3. При изучении фильтрационных свойств горных пород для общей характеристики соответствующих горизонтов и толщ имеют значение различные виды каротажа. Картаж проводится на неглубоких скважинах, входящих в состав детальной комплексной съемки, и на глубоких, данные исследования которых необходимы для суждения о фильтрационных свойствах пород, залегающих на большой глубине.

Ниже приводятся основные сведения о значении и возможностях различных видов геофизических работ для решения перечисленных выше задач.*

Электроразведочные работы, как было указано выше, являются одним из основных методов, применяемых при геологическом и гидрогеологическом картировании в комплексе с другими видами работ. Однако электроразведка не позволяет непосредственно оценивать проницаемость горных пород, что объясняется отсутствием функциональной зависимости между проницаемостью и электропроводностью. Размер и форма пустот очень сильно влияют на проницаемость, между тем как электропроводность зависит преимущественно от величины общей пористости. Заполнение пустот мелкодисперсным материалом очень сильно снижает проницаемость (например, при заполнении пустот глиной), а электропроводность (при постоянной минерализации воды, заполняющей пустоты) чаще всего увеличивается. Кроме того, электропроводность сильно возрастает при увеличении минерализации воды, а для некоторых пород также вследствие электропроводности их минерального скелета (у графитовых и углистых сланцев, а также у пород, богатых серным колчеданом и другими сульфидами), что почти не оказывает влияния на проницаемость.

Выделение зон повышенной закарстованности по данным электроразведки может быть удовлетворительным, но установить этим методом местоположение и размеры карстовых полостей удается лишь при очень больших их размерах, неглубоком залегании и полном заполнении водой или материалом со значительной электропроводностью.

Большие трудности вызывает обычно интерпретация данных электроразведки для пород, находящихся в зоне аэрации, так как электропроводность пород в этой зоне весьма непостоянна и зависит преимущественно от степени и характера заполнения пустот и полостей электропроводящим материалом.

Хотя стандартные методы электроразведки с поверхности не позволяют оценивать фильтрационные свойства горных пород, при наличии удовлетворительной корреляционной связи между электропроводностью и проницаемостью все же можно судить о порядке последней.

Сейсмические методы разведки в принципе решают те же задачи, что и электроразведка, но производство их сложнее. Однако достоинством этих методов является возможность сравнительно легко определить границу слаботрещиноватых малопроницаемых скальных пород даже при наличии покрывающих их нескальных пород довольно большой мощности.

Преимуществом сейсмических методов по сравнению с электроразведкой является также то, что на их результаты не влияет

* В данной книге не рассматривается техника и методика геофизических работ и способы интерпретации их результатов.

химический состав воды, заполняющей пустоты. Кроме того, эти методы дают возможность оценивать степень трещиноватости пород как в зоне аэрации, так и ниже уровня подземных вод.

Гравиразведка и магниторазведка при гидрогеологических работах применяются редко. Используются они главным образом для выяснения геологического разреза в специфических случаях. Так, например, гравиразведка применима для определения глубины залегания и оконтуривания соляных залежей, а магниторазведка — пород, богатых железом или, наоборот, обладающих диамагнитными свойствами.

Различные методы каротажа дают результаты, аналогичные геофизическим работам, проводимым с поверхности, но характеризуют только концентрическую зону вокруг исследуемой скважины. Это позволяет детализировать разрез изучаемого горизонта, что особенно существенно для глубоких скважин при малом количестве отбираемых образцов.

Электрокартаж, так же как и электророндирование и электропрофилирование, не дает возможности определить непосредственно фильтрационные свойства пород, пройденных скважиной. Однако детализация разреза водоносных горизонтов, получаемая в результате электрокаротажа, имеет значение для слоистых пород, в частности дает возможность судить об их фильтрационной анизотропии.

Большое значение имеет установление при каротаже естественного потенциала ПС, позволяющее выделить наиболее проницаемые слои и даже качественно определить их проницаемость, если минерализация воды в скважине и пластовой воды практически одинакова, в противном случае появляются дополнительные потенциалы, затрудняющие выделение и характеристику проницаемых слоев.

При не очень сложном разрезе электрокартаж в комплексе с другими методами каротажа, а также данные лабораторных определений для мелкопористых пород позволяют в первом приближении судить о проницаемости и пустотности исследуемых пород.

Сейсмоакустический картаж применяется преимущественно для трещиноватых пород: выделяются зоны различной степени сохранности, тектонические нарушения и т. п. Для осадочных трещиноватых пород сейсмоакустический картаж позволяет детализировать их разрез.

Сейсмоакустическое просвечивание дает возможность получить аналогичные данные для пород, находящихся в промежутке между скважинами, расположенными на небольших расстояниях друг от друга.

Гамма- и гамма-нейтронный картаж служат главным образом для детализации разреза осадочных пород при малом количестве образцов. Эти методы чаще, чем другие, позволяют установить положение и мощность глинистых практически непроницаемых слоев.

Следует еще раз подчеркнуть, что все виды геофизических работ должны проводиться в едином комплексе. При этом недочеты результатов одних видов работ компенсируются данными других. Выбор наиболее эффективного метода геофизических работ должен, очевидно, производиться с учетом геологического строения и гидрогеологических условий района.*

Более подробные сведения имеются в соответствующих руководствах [50, 52, 136, 142, 145].

§ 2.9. Данные о водопритоках в различные выработки и производительности скважин

Данные о водопритоках и производительности скважин имеют значение для оценки проницаемости всех видов горных пород при наличии водных пунктов, приуроченных к изучаемым горизонтнам и находящихся в условиях, достаточно близких к участку исследований.

Для предварительной оценки проницаемости трещиноватых и закарстованных пород сведения о водопритоках являются наиболее надежными, поскольку характеристика этих пород по визуальным признакам, данным геологических наблюдений и т. д. затруднительна и может быть ошибочной.

Для пористых обломочных цементированных пород указанный метод также является наиболее надежным, поскольку визуальная оценка фильтрационных свойств редко дает для них правильные результаты и отбор представительных образцов часто связан с затруднениями.

Однако оценка фильтрационных свойств по данным о водопритоках имеет следующие недостатки.

1. Метод применим только для пород, находящихся ниже уровня подземных вод.

2. Сведения о водных пунктах, имеющиеся в различных организациях, могут быть результатом единичных измерений и при непостоянном режиме водопритоков иметь случайный характер; иногда эти сведения бывают ошибочными. Производительность скважин часто бывает заниженной из-за неудовлетворительной конструкции фильтра, неправильной установки его, засоренности и т. п.

3. При непостоянстве проницаемости трещиноватых и закарстованных пород оценка ее по данным о производительности малого числа скважин (или колодцев) может быть также случайной. Этого недостатка лишены сведения о водопритоках в горные выработки большой площади.

* В данной главе приведены лишь сведения о геофизических работах, проводимых в стадии предварительных исследований. Геофизические работы, выполняемые в комплексе с опытными гидрогеологическими работами в стадии детальных исследований, рассматриваются во второй и третьей частях книги.

4. Поскольку дебит источников зависит не только от проницаемости пород водоносных горизонтов, к которым они приурочены, но также от условий разгрузки и питания этих горизонтов, оценка проницаемости по дебиту источников бывает иногда неверной. Так, например, при разгрузке на дне рек или путем перетока в другие водоносные горизонты (чаще всего в четвертичных отложениях) к водоносным горизонтам с высокой водообильностью могут быть приурочены лишь небольшие источники (иногда источники из этих горизонтов вовсе отсутствуют).

Степень проводимости верхних трещиноватых зон жестких пород или безнапорных водоносных горизонтов в областях избыточного увлажнения может быть весьма ориентировочно оценена по уклону водной поверхности на склонах дренирующих эти горизонты долин или других депрессий рельефа. При этом значительный уклон водной поверхности наблюдается при низкой проводимости, а большой уклон — при высокой.

5. Определение пустотности для нецементированных пород путем лабораторных определений дает удовлетворительные результаты и не связано с существенными затруднениями.

Значительно сложнее определение пустотности для трещиноватых и закарстованных пород. В методическом руководстве Гидропроекта, составленном Л. Н. Нейштадт и И. А. Пироговым [107], из числа этих методов рекомендуется определение пустотности или отношения общей площади свободного пространства трещин или других пустот к площади разработанной ровной площадки или свободной поверхности горных выработок. Расчет пустотности производится на основании зарисовки и измерения всех трещин и пустот.

Определение трещинной пустотности по данным зарисовки естественных обнажений дает в большинстве случаев неверные результаты, поскольку, очевидно, трещиноватость пород в обнажениях значительно больше, чем за пределами верхней разгруженной зоны пород.

Применяемое иногда определение трещинной пустотности на основании описания керна колонковых скважин редко дает удовлетворительные результаты, так как рыхлый заполнитель трещин при бурении размывается и в керне наблюдаются перерывы, соответствующие преимущественно самым крупным незаполненным или частично заполненным трещинам.

Для установления частоты трещин предложен ряд методов [107], из которых автор считает удовлетворительным наиболее простой, заключающийся в подсчете количества трещин отдельных систем, приходящихся на 1 м линии, нормальной к их поверхности; соответствующие данные при наличии достаточно обоснованного коэффициента трещинной пустотности и относительно постоянной проводимости трещин отдельных систем позволяют в первом приближении оценить проницаемость пород по зависимостям, приведенным во второй части книги (см. § 4.2).

Наряду с методами каротажа, описанными выше, для изучения трещиноватости горных пород имеет значение кавернометрия.

При исследованиях для высоких плотин на скальном основании бурятся скважины диаметром до 140 см станками ТМ * (типа «Каликс»). В эти скважины глубиной до 40—50 м можно спуститься для осмотра и описания стенок; поднимаемый керн большого диаметра также дает возможность изучить трещиноватость, литологию и другие особенности пород полнее, чем при бурении скважин обычного диаметра. Скважины, буримые станками типа «Каликс» в водоносных породах, требуют предварительной цементации пород на участке своего заложения.

В последнее время разработаны методы фотографирования стенок скважин (диаметром не менее 100 мм), а также создан телевизионный передатчик, спускаемый в скважину диаметром не менее 127 мм и позволяющий осмотреть и сфотографировать на поверхности телевизионное изображение стенок.

Созданная в Ленгидропроекте Ю. Н. Мироновичем и Я. З. Ильинским телевизионная установка УТФ-1М имеет передатчик, спускаемый в скважину диаметром 110 или 147 мм. Установка дает круговой обзор стенок скважины через каждые 5 см. Она успешно применялась на строительстве Чиркейской ГЭС в 1947 г., а затем при исследованиях для Колымской и Буреинской ГЭС.

Перечисленные методы применимы также для изучения закарстованных пород, пробуренных скважинами.

Пустотность трещиноватых и закарстованных пород наиболее надежно может быть определена расчетами, основанными на уравнениях неустановившегося движения безнапорных вод (см. § 7.7). Однако эти методы применимы лишь для зоны, соответствующей режимным колебаниям зеркала подземных вод или депрессионной поверхности при откачках.

§ 2.10. Ориентировочная оценка фильтрационных свойств горных пород по аналогии с другими районами

Фильтрационные свойства горных пород ориентировочно можно оценить по данным, относящимся к аналогичным по генезису, литологии и геологическому возрасту толщам пород, при этом следует учитывать общие закономерности для пород данного типа и характерные для них значения проницаемости и пустотности, приведенные в табл. 2.3.

Сущность рекомендуемого способа очевидна на основании следующих примеров.

1. Угленосные свиты, представленные преимущественно терригенными цементированными породами, почти везде имеют

* Станок Ткаченко — Мельковицкого.

довольно близкие фильтрационные свойства. Так, угленосная свита каменноугольного возраста, развитая в Донбассе, близка по литологии и фильтрационным свойствам к таким же свитам на Урале, а также к угленосным свитам пермского и позднекаменноугольного возраста в Кузнецком бассейне. Максимальный коэффициент проницаемости везде в этих свитах наблюдается у слоев известняков небольшой мощности (обычно до 100 дарси), а среди терригенных пород у грубозернистых песчаников (обычно не выше 30—50 дарси).

2. Мел и меловые мергели на большой территории европейской части СССР и в Западной Европе (Франция, Англия и другие страны) близки друг к другу по фильтрационным свойствам.

3. Породы нижнеюрской туфо-порфиритовой серии развиты в различных районах Закавказья (Азербайджан, Грузия); имеют аналогичный петрографический состав, сходную стратификацию и не сильно отличаются друг от друга по трещиноватости и фильтрационным характеристикам (в близких высотных и климатических зонах).

Предварительная оценка фильтрационных свойств горных пород по аналогии с другими районами дает приемлемые результаты для однообразных толщ осадочных и вулканогенных пород, залегающих в виде покровов. Этот метод имеет значение преимущественно для малоизученных районов с незначительным количеством водных пунктов, но применение его требует большого опыта и высокой квалификации исполнителей.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЛЬТРАЦИИ
В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

ЛИНЕЙНЫЙ ЗАКОН ФИЛЬТРАЦИИ
(ЗАКОН ДАРСИ) *

Линейный закон фильтрации (закон Дарси) относится к числу очень простых широко распространенных законов.

Общее выражение закона Дарси, применяемое для различных жидкостей (при ламинарном движении), следующее:

$$u = \frac{k_{\text{п}}}{\eta} \frac{dp}{dl}, \quad (3.1)$$

где u — скорость фильтрации; $k_{\text{п}}$ — коэффициент проницаемости; η — абсолютная вязкость жидкости; p — давление; l — длина пути фильтрации.

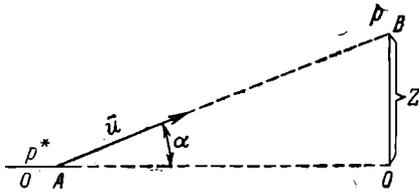


Рис. 3.1

Схема движения подземных вод под углом α к горизонтальной плоскости. $o-o$ — плоскость сравнения; p^* — приведенное давление в точке А; p — давление в точке В; α — угол наклона вектора скорости фильтрации.

Величина dp/dl представляет собой градиент давления и характеризует фильтрацию в горизонтальном направлении. При направлении движения под углом α к горизонтальной плоскости давление заменяется приведенным давлением p^* , согласно выражению

$$p^* = p + \gamma g Z, \quad (3.2)$$

где γ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести;

Z — относительная высота точки, где измеряется давление p

* Линейный закон фильтрации был установлен в 1856 г. французским инженером-гидротехником А. Дарси.

(точка B на рис. 3.1), над горизонтальной плоскостью сравнения, к которой приводится давление.

Соответственно градиент приведенного давления равен

$$\frac{dp^*}{dl} = \frac{dp}{dl} + \gamma g \frac{dZ}{dl} = \frac{dp}{dl} + \gamma g \sin \alpha. \quad (3.3)$$

При малых уклонах направления фильтрации синус угла может быть заменен его тангенсом.

Если ось Z направлена кверху, то при восходящем движении жидкости величина $\gamma g Z$ положительна, а при нисходящем — отрицательна.

Сущность величин, входящих в формулу (3.1), и их размерность были кратко указаны в первой части книги (см. гл. 1).

Закон Дарси и основанные на нем зависимости применимы для преобладающего числа случаев фильтрации в разнообразных породах. Но этот закон не является всеобщим и в соответствующих условиях характеризуется отклонениями, рассмотренными ниже.

§ 3.1. Различные виды формулы Дарси. Дифференциальные уравнения установившейся фильтрации

Замена величины приведенного давления p^* напором h , равным по выражению (3.2) $\frac{p^*}{\gamma g} + Z$ (скоростным напором для подземных вод почти всегда можно пренебречь), дает вместо формулы (3.1) следующую зависимость для скорости фильтрации*:

$$u = \frac{k_n \gamma g}{\eta} \cdot \frac{dh}{dl} = kI, \quad (3.4)$$

где $k = \frac{k_n \gamma g}{\eta}$ — коэффициент фильтрации (для воды коэффициент водопроницаемости); $I = \frac{dh}{dl}$ — градиент напора.

Таким образом, для перехода от коэффициента проницаемости к коэффициенту фильтрации служит формула

$$k = \frac{k_n \gamma g}{\eta}. \quad (3.5)$$

При измерении коэффициента фильтрации в метрах в сутки, коэффициента проницаемости в дарси, плотности жидкости в граммах на кубический сантиметр или в тоннах на кубический метр и вязкости в сантипуазах (эти единицы измерения наиболее удобны для практических расчетов) формула (3.5) приобретает вид

$$k = 0,864 k_n \frac{\gamma g}{\eta}. \quad (3.5a)$$

Вязкость воды различной минерализации и температуры может быть определена по графику рис. 3.2, который составлен путем

* Более подробное рассмотрение преобразования основной зависимости Дарси имеется во многих руководствах [171].

дополнения графика, приведенного в книге А. И. Силина-Бекчурина [138], данными о вязкости растворов хлористого натрия при температуре до 100° С [149] (график в книге А. И. Силина-Бекчурина доведен только до 25° С).

Влияние на вязкость растворов других солей при концентрации до 160—180 г/л примерно такое же, как хлористого натрия.

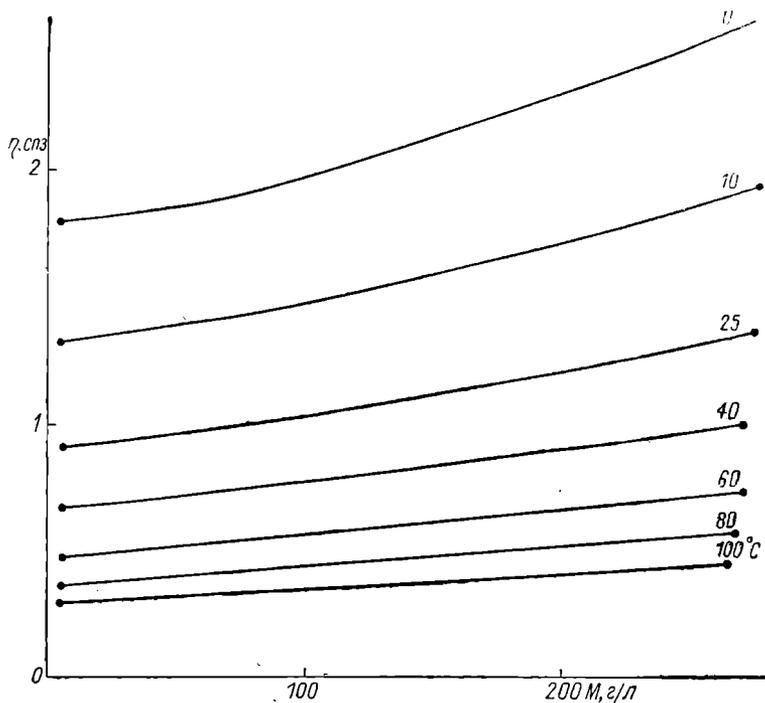


Рис. 3.2
Зависимость вязкости воды η от температуры и минерализации M (для растворов хлористого натрия).

При большей концентрации некоторые соли влияют на вязкость сильнее. В частности, для вод глубоких горизонтов имеет значение вязкость растворов хлористого кальция [172], которая у растворов, близких к насыщению CaCl_2 , в 1,8 раза больше, чем у насыщенных растворов NaCl .

Для пресной воды при 10° С формула (3.5) приобретает следующий вид (k — по-прежнему в метрах в сутки, $k_{\text{д}}$ — в дарси):

$$k = 0,66k_{\text{д}}. \quad (3.6)$$

В руководствах и большинстве работ по гидрогеологии широко применяется следующее выражение закона Дарси для расхода

воды Q через поперечное сечение потока подземных вод площадью F :

$$Q = kFI. \quad (3.7)$$

В некоторых случаях горные породы заключают кроме воды свободный газ или первоначально последний растворен в воде и выделяется из нее при понижении давления, например при откачках из скважин. Образование свободного газа в породах может происходить также вследствие биохимических процессов. Поэтому ниже приводятся основные сведения о законах фильтрации для двухфазной системы вода — газ.

Наличие заземленных пузырьков газа в мелкопористых породах (песчаниках, песках, алевролитах и т. п.) сильно уменьшает проницаемость этих пород из-за влияния сил поверхностного натяжения на поверхности пузырьков. Эти силы проявляются тем сильнее, чем меньше размеры пор. Коэффициент проницаемости для воды в данном случае определяется ее фазовой проницаемостью. Последняя рассматривается в данной книге только для двухфазной системы вода — газ.* Типичный график фазовой проницаемости для такой системы, взятый из книги И. А. Чарного [157], показан на рис. 3.3.

Фазовая проницаемость определяется путем лабораторных исследований или принимается по аналогии с имеющимися фактическими данными для пород, близких к изучаемым по величине пористости и проницаемости, а также по форме поровых или других проводящих каналов.

Проницаемость в формуле Дарси (3.1) считается постоянной, что в действительности может не иметь места вследствие развития сложных процессов взаимодействия между водой и минеральным скелетом пород. Однако для пород с высокой проницаемостью и при отсутствии тонкодисперсного материала влиянием этих процессов можно пренебречь.

* Поскольку содержание настоящей книги относится к области гидрогеологии, в ней приводятся только самые общие сведения, относящиеся к подземной газовой динамике.

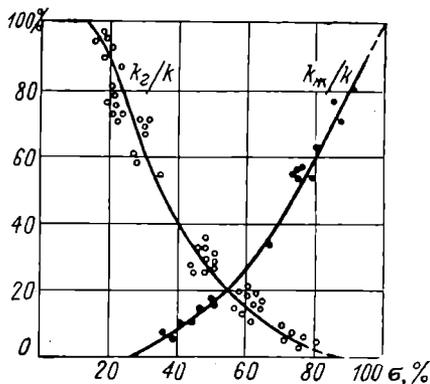


Рис. 3.3
Относительные фазовые проницаемости для газированной жидкости, по И. А. Чарному [157].

σ — насыщенность породы жидкостью; $k_{г}/k$ и $k_{ж}/k$ — относительная проницаемость.

Фильтрация газа при небольших градиентах давления также подчиняется закону Дарси, но соответствующая зависимость несколько сложнее формулы (3.1), так как сжимаемостью газов, во много раз большей, чем у воды, нельзя пренебречь. Вопросы фильтрации газа рассмотрены во многих трудах [91, 171].

Ниже приводятся наиболее общие дифференциальные уравнения линейного закона фильтрации при установленном режиме, отдельные решения которых или зависимости, получаемые путем моделирования, являются основой для расчетов проницаемости по данным опытных гидрогеологических работ.

1. Разложение вектора скорости фильтрации в направлении осей координат x , y и z и уравнение неразрывности жидкости, которая считается несжимаемой, приводят к дифференциальному уравнению Лапласа [151]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0, \quad (3.8)$$

где h — напор в точке с координатами x , y и z .

Результаты сложного процесса интегрирования уравнения (3.8) при заданных граничных условиях, как известно, представляют собой решения пространственных задач установившейся фильтрации. Однако для получения зависимостей, применяемых для определения проницаемости, имеют значение другие виды уравнения Лапласа, интегрирование которых в отдельных случаях проще, чем уравнения (3.8).

2. Большинство полевых методов определения фильтрационных параметров заключается в исследовании скважин или шурфов, при котором создается поток подземных вод, обычно достаточно близкий к радиальному (осесимметричному). Для такого потока в общем случае, когда напор зависит от радиуса вектора r (расстояния от оси скважины) и высоты по отношению к горизонтальной плоскости сражения, уравнение Лапласа имеет вид [100]

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0. \quad (3.9)$$

Интегрирование этого уравнения дает зависимости, соответствующие откачкам или нагнетаниям для гидродинамически несовершенных скважин.

3. Для планового радиального потока, т. е. при независимости напора от высотной отметки, дифференциальное уравнение (3.9) в частных производных переходит в обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 h}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dh}{dr} = 0. \quad (3.10)$$

Решение этого уравнения несложно и приводит к известной формуле Дюпюи для напорных вод, обычно получаемой еще более простым путем [111].

Уравнение Лапласа описывает не только фильтрацию, но также другие физические процессы, как, например, прохождение постоянного и переменного тока, неизменного во времени, через проводящую среду или установившийся тепловой поток.

В первом случае распределение потенциала возникающего электрического поля одинаково с распределением напора в фильтрационном потоке, почему в уравнении Лапласа напор заменяется электрическим потенциалом. Аналогично у теплового потока напорю соответствует температура.

Одинаковые дифференциальные уравнения, описывающие различные физические явления, дают возможность применять для решения задач динамики подземных вод моделирование.

В гидротехнике и гидрогеологии, как известно, широко применяется метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), имеющий также значение для решения вопросов, возникающих при определении проницаемости горных пород по данным опытных гидрогеологических работ в сложных условиях движения подземных вод [51, 115].

Аналогия между фильтрацией и электрическим током может быть наглядно представлена также соответствием друг другу законов Дарси и Ома.

В настоящее время кроме сплошных моделей ЭГДА, у которых фильтрационный поток моделируется сплошным геометрически подобным электрическим потоком, широко применяются сеточные (сеточные электроинтеграторы) [115]. Сеточные модели представляют собой сетку электрических сопротивлений, чаще всего четырехугольную, иногда треугольную или другую, соединенных в узлы. Теоретической основой этих моделей является интегрирование дифференциальных уравнений методом конечных разностей, почему сеточные модели обычно и называются электроинтеграторами.

Уравнение Лапласа для планового плоского движения применяется также для безнапорных вод, однако только как приближенное, не учитывающее вертикальной составляющей скорости фильтрации.*

§ 3.2. Дифференциальное уравнение пластового радиального потока подземных вод при перетоке из других горизонтов

Значение перетока из одного водоносного горизонта в другой через разделяющие слабопроницаемые породы было отмечено в первой части книги (см. § 2.3).

Дифференциальные уравнения, описывающие установившееся движение подземных вод при наличии перетока и их решения,

* Подобные уравнения и формулы, полученные путем их интегрирования, являются гидравлическими в противоположность гидромеханическим, учитывающим все составляющие скорости фильтрации.

были даны А. Н. Мятиевым [105] и независимо от него Н. К. Гиринским [43].

Ниже рассматривается уравнение планового радиального потока при перетекании со стороны кровли и почвы для горизонтально залегающих пластов неограниченного распространения. Предполагается, что откачка не влияет на напор «питающих» горизонтов. Движение воды в основном горизонте, из которого производится откачка, горизонтальное, в разделяющих слабопроницаемых слоях — вертикальное. При этих условиях движение подземных вод описывается приведенным уравнением типа уравнения Бесселя:

$$r \frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{dS}{dr} - \zeta S r = 0, \quad (3.11)$$

где S — понижение пьезометрического уровня на расстоянии r от оси скважины; ζ — коэффициент связи, называемый также фактором перетекания [44], равный

$$\zeta = \frac{1}{kM} \left(\frac{k_1}{M_1} + \frac{k_2}{M_2} \right); \quad (3.12)$$

kM — водопроницаемость основного горизонта, из которого производится откачка; k_1 и M_1 — соответственно средний вертикальный коэффициент фильтрации и мощность верхнего разделяющего пласта; k_2 и M_2 — то же, для нижнего разделяющего пласта.

§ 3.3. Линейный закон фильтрации для слабопроницаемых пород; начальный градиент

Довольно многочисленные лабораторные исследования и другие данные (см. ниже) указывают на то, что зависимость между скоростью фильтрации и градиентом напора у малопроницаемых глинистых пород может иметь несколько другой вид, чем выражение (3.4). Это видно из графика (рис. 3.4), где линия этой зависимости имеет начальный участок со скоростью фильтрации, первоначально почти равной нулю, затем быстро возрастающей и в дальнейшей прямолинейной части соответствующей закону Дарси. В данном случае скорость фильтрации u выражается формулой, представляющей собой упрощенную зависимость Букингема — Райнера:

$$u = k(I - I_0), \quad (3.13)$$

где I_0 — начальный градиент, величина которого является нижней границей применимости закона Дарси в обычной форме.

По данным лабораторных исследований, выполненных С. А. Роза [132], начальный градиент у глин иногда достигает 15—31, несмотря на довольно высокую естественную влажность (27—32,5%). На высокие начальные градиенты глин указывает также Б. Ф. Рельтов [131]. Высокие начальные градиенты, как было указано в первой части книги, характерны для торфа и,

по-видимому, для илов и других пород, богатых органическими веществами.

Однако существует точка зрения, отрицающая наличие начального градиента, что основывается на некоторых американских работах [178], а также исследованиях, выполненных В. Н. Жиленковым в фильтрационной лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева.

Автор ниже излагает свою точку зрения по данному вопросу.

1. Поскольку наличие начального градиента бесспорно установлено для грунтов, содержащих коллоиды органического и минерального состава, например для торфа и богатых коллоидами глин, можно утверждать, что начальный градиент существует и иногда может быть значительным. Нельзя отрицать также наличия начального градиента у пород, заключающих всю воду в молекулярно связанном состоянии.

2. Природа начального градиента обусловлена особенностями структурных жидкостей и водно-коллоидных агрегатов, а также молекулярно связанной воды, у которых коэффициент внутреннего трения τ определяется формулой Ньютона с дополнительным слагаемым τ_0 — начальным сопротивлением сдвигу (сцеплением). Соответствующая зависимость имеет вид [166]

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dN}, \quad (3.14)$$

где $\frac{du}{dN}$ — производная скорости движения жидкости по нормали к ее направлению.

Величина τ_0 может быть того же порядка, что и второе слагаемое формулы (3.14). Высокое значение τ_0 характерно и имеет большое практическое значение для глинистых растворов, применяемых при бурении, особенно у растворов, изготовляемых из глинопорошка с высоким содержанием монтмориллонита. Малые величины τ_0 (порядка одной десяти тысячной грамма на квадратный сантиметр) были обнаружены и у обычной воды даже после двукратной дистилляции [20].

3. На наличие начального сопротивления сдвигу и начального градиента фильтрации указывают также явления, наблюдаемые при бурении и исследовании буровых скважин: полное прекращение поглощения промывочной жидкости в породах с мелкими

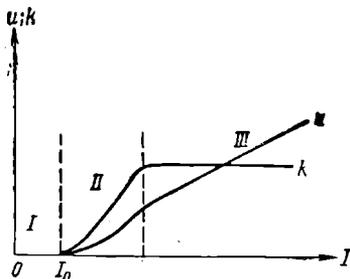


Рис. 3.4

Схематический график зависимости скорости фильтрации и коэффициента фильтрации от градиента напора при наличии начального градиента.

I — участок начального градиента, $u \approx 0$; *II* — переходный участок; *III* — область линейного закона фильтрации, $k = \text{const}$.

порами или тонкими трещинами [70], трудность, а нередко и невозможность деглинзации скважин при недостаточной разности напоров, трудно устраняемое засорение фильтров опытных и «нереагирующих» наблюдательных скважин и т. п.

4. Физико-химические свойства коллоидных растворов и упомянутые фактические данные указывают на то, что наличие начального градиента и фильтрации, подчиняющейся зависимости (3.14), в ряде случаев соответствует действительности. Однако при фильтрации воды, не заключающей коллоидов, через породы, также не содержащие тонкодисперсных частиц, величина начального градиента крайне мала и обнаружить ее очень трудно.

Опыты С. А. Розе и Б. Ф. Рельтова, вероятно, дали преувеличенные значения начального градиента, так как в процессе их еще продолжалась консолидация грунта.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Нелинейные зависимости скорости фильтрации от градиента давления или напора возникают в породах с высокой проницаемостью при большой интенсивности фильтрации. Общей характеристикой нелинейных зависимостей является уменьшение скорости фильтрации по сравнению с ее величиной, соответствующей закону Дарси, т. е. увеличение фильтрационного сопротивления.

Отклонения от закона Дарси и переход его в нелинейные законы фильтрации происходят при критическом значении градиента напора $I_{кр}$, находящемся в прямой зависимости от размеров и формы поперечного сечения каналов или ходов, по которым движется вода.

Основной причиной отклонений от закона Дарси является переход ламинарного движения воды в турбулентное. Однако небольшие отклонения от линейного закона возможны еще при ламинарном движении [94, 171].

Отклонения от закона Дарси при градиентах напора, наблюдаемых в природных условиях, возможны только для пород, сильно закарстованных или пересеченных незаполненными трещинами с большим раскрытием, а также для грубообломочных, не имеющих заполнителя: промытых галечников, крупного гравия, щебня и т. п.

При движении подземных вод к буровым скважинам и другим водозаборам отклонения от закона Дарси могут возникнуть и в породах с меньшими размерами проводящих воду каналов и меньшей проницаемостью, но они имеют место в ограниченной зоне, окружающей водозабор, где градиенты напора превышают свое критическое значение. Возможность дополнительных потерь напора, обусловленных отклонениями от закона Дарси, должна учитываться при расчетах фильтрационных параметров по данным опытных гидрогеологических работ во избежание получения заниженных значений коэффициента проницаемости или фильтрации.

§ 3.4. Пределы применимости закона Дарси. Основные нелинейные зависимости

Критическая скорость фильтрации $u_{кр}$, равная произведению $kI_{кр}$, может быть рассчитана так же, как при движении воды по трубам, на основании критического значения безразмерного параметра — числа Рейнольдса — $N_{кр}$ по формуле

$$u_{кр} = \frac{\nu}{d} N_{кр}, \quad (3.15)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости; d — характерный размер поперечного сечения водопрводящих каналов.

Численное значение $N_{кр}$ для горных пород, однако, другое, чем для труб, и зависит от типа породы и выбора характерного размера d .

1. Для пористых горных пород (рыхлых и сцементированных) зависимость между $u_{кр}$ и $N_{кр}$ в общей форме имеет вид [171]

$$N_{кр} = \frac{A u_{кр} \sqrt{k_{п}}}{m^{\alpha} \nu}, \quad (3.16)$$

где m — пористость; A и α — постоянные величины.

Из числа вариантов зависимости (3.16), предложенных различными авторами, шире всего применяется формула В. Н. Щелкачева [171], достаточно обоснованная и дающая результаты, соответствующие действительности:

$$N_{кр} = \frac{10 u_{кр} \sqrt{k_{п}}}{m^{2/3} \nu}. \quad (3.17)$$

В этой формуле $u_{кр}$ измеряется в сантиметрах в секунду; $k_{п}$ — в дарси; ν — в сантистоксах.

Обычные значения $N_{кр}$ в формуле (3.17) по данным лабораторных опытов и по исследованиям скважин находятся в интервале от 4 до 12, иногда $N_{кр}$ уменьшается до единицы.

Для получения представления о порядке величины $u_{кр}$ формула (3.17) приведена к виду

$$u_{кр} = 45,8 \frac{m^{2/3} \nu}{k_{п}^{3/2}} N_{кр}. \quad (3.18)$$

Расчеты $u_{кр}$ и $I_{кр}$ по формуле (3.18) при $m = 0,2$, $\nu = 1$ сст (для пресной воды при 10°C), $N_{кр} = 8$ (среднее значение) дают следующие результаты:

$k_{п}$, дарси	$I_{кр}$	$u_{кр}$, м/сутки
1	368	248
10	11,6	7,8
100	0,368	0,248
500	0,033	0,023
1000	0,012	0,008

Данные расчетов показывают, что у пористых пород отклонения от закона Дарси при градиентах напора, наблюдаемых в природных условиях, могут происходить только при проницаемости не менее нескольких сотен дарси, т. е. у галечников, гравия и щебня без заполнителя. При откачках со значительным понижением и особенно при нагнетаниях градиенты напора на рабочей поверхности скважины (водоприемной поверхности при откачках) могут быть очень высокими. В данном случае отклонения от закона Дарси в ограниченной зоне возможны для пород с проницаемостью порядка 10 дарси и менее.

II. Основой для нахождения критического градиента у трещиноватых пород являются данные многочисленных лабораторных опытов по изучению условий движения воды по щелям с различным раскрытием и гладкими и шероховатыми стенками. Такие опыты производились в 1938—1939 гг. под руководством автора, несколько позднее И. Ф. Володько [33] и в большом объеме и разнообразных условиях (в том числе и для рыхлых пород) Г. М. Ломизе [94]. Результаты опытов, проведенных в различных лабораториях, согласуются друг с другом.

На основании формулы Рейнольдса (3.15) и данных перечисленных исследований автором [61] получены следующие зависимости для $u_{кр}$ и $I_{кр}$ при движении воды по щели с постоянным раскрытием b :

$$u_{кр} = \frac{2sv}{b} = \frac{2sv\sqrt{A}}{\sqrt{k_d}} N_{кр}; \quad (3.19)$$

$$I_{кр} = \frac{2sv}{Ab^3} N_{кр} = \frac{2sv\sqrt{A}}{k_d^{3/2}} N_{кр}, \quad (3.20)$$

где s — коэффициент извилистости (отношение фактической длины щели к длине соответствующего прямолинейного отрезка, обычно $1 \leq s \leq 2$); A — параметр, определяющий водопроницаемость щели (для гладких щелей при $s = 1$ $A = \frac{1}{12} \cdot \frac{\nu g}{\eta}$, где ν — плотность воды; g — ускорение силы тяжести; для шероховатых A — меньше; наименьшее значение A по данным лабораторных опытов около $1800 \text{ см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$, для гладких щелей при пресной воде с температурой 10°С $A = 8200 \text{ см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$); k_d — коэффициент действительной скорости, т. е. средняя скорость движения воды по щели при градиенте, равном единице, и ламинарном движении.

Величина k_d связана с раскрытием щели зависимостью

$$k_d = Ab^2. \quad (3.21)$$

Зависимости для расчета параметра A (обозначение автора) для шероховатых щелей имеются в книге Г. М. Ломизе [94].

Величина b для реальных трещин в горных породах является усредненным раскрытием, но меньшим среднего арифметического,

так как водопроводимость трещины при ламинарном движении согласно формуле (3.21) пропорциональна третьей степени b .

Критическое значение числа Рейнольдса $N_{кр}$ может изменяться в пределах от 30 до 200, причем малые значения $N_{кр}$, так же как и параметра A , соответствуют трещинам со значительной шероховатостью стенок и извилистостью.

О порядке величин $u_{кр}$ и $I_{кр}$ для щелей с различным раскрытием и проводимостью можно судить на основании данных расчетов по формулам (3.19) и (3.20) (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Критические градиент и скорость движения воды для трещин *

Параметры	Раскрытие щели, см					
	0,01	0,1	0,2	0,5	1	2
Коэффициент действительной скорости k_d , см/сек	0,3	30	120	750	3000	12 000
Водопроводимость $k_d b$, см ² /сек	0,003	0,3	24	375	3000	24 000
Критическая скорость $u_{кр}$, см/сек	150	15	7,5	3,0	1,5	0,75
Критический градиент $J_{кр}$	500	0,5	0,063	0,004	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$

* При расчетах принято: $N_{кр} = 50$, $s = 1,5$, $\nu = 0,01$ ст, $A = 3000$ см⁻¹·сек⁻¹.

Данные табл. 3.1 показывают, что при градиентах напора, наблюдаемых в природных условиях, движение воды по трещинам преимущественно является ламинарным и подчиняется закону Дарси. Только при раскрытии трещин, превышающем 1,5—2 мм, могут в естественных потоках трещинных вод возникнуть отклонения от закона Дарси. При опытных гидрогеологических работах эти отклонения возможны при $b = 0,05 \div 0,1$ см.

Для суждения о порядке величин критического градиента у трещиноватых пород для идеальной модели трещиноватой породы, характеризующейся наличием трех систем взаимно перпендикулярных одинаковых трещин, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга, получена формула [61] *

$$I_{кр} = \frac{4s\nu}{kl} N_{кр} \quad (3.22)$$

Приведенные в табл. 3.2 результаты расчетов по формуле (3.22) дают представление о порядке величины $I_{кр}$ для трещиноватых пород с различной проницаемостью и плотностью трещин. При расчетах принято: $s = 1,5$, $\nu = 0,01$ ст, $N_{кр} = 50$.

* Для формулы (3.22) и ряда других, приведенных ниже, удобнее пользоваться коэффициентом фильтрации, а не коэффициентом проницаемости, как это преимущественно принято в данной книге.

Таблица 3.2
*Ориентировочные величины критического градиента
 для идеальной модели трещиноватой породы*

k при 10°C , м/сутки	$k_{п.}$ дарси	$I_{кр}$ при l , м		
		0,1	1,0	10,0
1	1,33	30	3	0,3
10	13,3	3	0,3	0,03
100	133	0,3	0,03	0,003
500	665	0,06	0,006	$6 \cdot 10^{-4}$
1000	1330	0,03	0,003	$3 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчетов по формуле (3.22) показывают, что у пород со средней и высокой проницаемостью, пересеченных редкой сетью открытых трещин, отклонения от закона Дарси возможны при градиентах порядка сотых и тысячных долей единицы, т. е. в условиях, характерных для естественных потоков подземных вод. При густой сети трещин закон Дарси может быть действителен для пород средней проницаемости даже при довольно высоких градиентах.

Реальные трещиноватые породы почти всегда пересечены трещинами с различными раскрытием и проводимостью, почему при увеличении градиента (например, при откачках или нагнетаниях) отклонения от закона Дарси первоначально возникают у трещин с более высокой проводимостью, а затем постепенно распространяются на более мелкие трещины. Вследствие этого критические градиенты для природных трещиноватых пород всегда меньше, чем рассчитанные по формуле (3.22), относящейся к идеальной модели.

III. У закарстованных пород турбулентное движение часто развивается при небольших градиентах напора.

Безнапорное движение воды в карстовых каналах, наблюдаемое у нижней границы зоны аэрации и в «подвешенных» закарстованных горизонтах, почти всегда турбулентное и подчиняется зависимостям для течения воды в открытых потоках.

Напорное движение воды в карстовых каналах может быть как ламинарным, так и турбулентным, что зависит от их поперечного сечения, степени и характера заполнения, неровностей стенок и т. п., а также, очевидно, от величины градиента напора.

В случае постепенного увеличения градиента, например при откачках, турбулентное движение (если оно не наблюдалось в естественных условиях) первоначально развивается в крупных незаполненных каналах большого размера, а затем распространяется и на более мелкие.

Вследствие этого и обычного непостоянства поперечного сечения карстовых каналов, их извилистости, частичного заполнения

и т. д., а также неравномерного распределения даже ориентировочное определение значений $u_{кр}$ и $I_{кр}$ для закарстованных пород очень затруднительно.

Однако для предварительного суждения о порядке указанных величин могут служить зависимости, полученные автором на основе формул Рейнольдса (3.15) и Пуазейля для ламинарного движения воды по цилиндрическому каналу постоянного поперечного сечения. Критическое значение числа Рейнольдса $N_{кр}$ принято по данным трубной гидравлики изменяющимся в интервале от 300 до 500. Указанные зависимости, относящиеся к схематической модели закарстованной породы, следующие:

$$u_{кр} = \frac{2v}{r} N_{кр} = \sqrt{\frac{0,5gv}{k_d}} N_{кр}; \quad (3.23)$$

$$I_{кр} = \frac{16v^2}{gr^3} \left\{ N_{кр} = \frac{\sqrt{0,5gv}}{k_d^{3/2}} N_{кр} \right. \quad (3.24)$$

где r — радиус цилиндрического канала.

В табл. 3.3 приведены результаты расчетов по формулам (3.23) и (3.24), произведенных при $N_{кр} = 400$ и $v = 0,01$ см²/сек.

Таблица 3.3
Ориентировочные величины критического градиента
для модели закарстованной породы

Параметры	r , см				
	0,1	1	3	5	10
$u_{кр}$, см/сек	80	8	2,7	1,6	0,8
$I_{кр}$	0,65	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$
k_d , см/сек	123	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

Данные расчетов показывают, что в карстовых каналах даже сравнительно небольшого диаметра закон Дарси действителен лишь при незначительной скорости движения воды и малых градиентах напора.

Однако в природных условиях значения критических скоростей и градиентов обычно значительно больше, чем указанные в табл. 3.3, так как карстовые каналы, как правило, частично заполнены рыхлым материалом или кальцитом и другими минералами, а также имеют участки со значительно уменьшенным поперечным сечением, вследствие чего в формулах (3.23) и (3.24) усредненный радиус r должен быть близким к своему значению на суженных участках каналов.

IV. Нелинейные зависимости скорости фильтрации от градиента напора, предложенные различными авторами, неодинаковы. Ниже кратко рассматриваются главнейшие из них.

1. Формула Шези — Краснопольского по существу одинакова с зависимостями для турбулентного движения в трубах:

$$u = k_T \sqrt{I}, \quad (3.25)$$

где k_T — коэффициент водопроницаемости.

Величина k_T не равна коэффициенту фильтрации в формуле Дарси для той же породы (исключая случай $I = 1$), а связана с последним соотношением [61]

$$k_T = k \sqrt{I_{кр}}. \quad (3.26)$$

Формула (3.25) представляет собой квадратичный закон фильтрации и справедлива для различных пород с очень высокой и высокой проницаемостью при турбулентном движении, охватывающем все проводящие каналы. Показатель степени при I иногда считается немного бóльшим 0,5.

2. Формула Прони

$$I = a_1 u + a_2 u^2, \quad (3.27)$$

где a_1 и a_2 — параметры, принадлежит к числу хорошо обоснованных и представляет закон фильтрации, промежуточный между линейным и квадратичным. Недостатком этой зависимости является сложность основанных на ней формул для определения притока воды к скважинам и другим водозаборам. Кроме того, параметры a_1 и a_2 для реальных горных пород обычно непостоянны: при увеличении I величина a уменьшается в пределе до нуля и рассматриваемая зависимость переходит в формулу квадратичного закона фильтрации; при уменьшении I аналогично стремится к нулю значение a_2 и получается выражение линейного закона фильтрации.

3. Зависимость Смрекера

$$u = k_C I^{1/m}, \quad (3.28)$$

где k_C — коэффициент водопроницаемости, численно неравный аналогичным коэффициентам в зависимостях линейного и квадратичного законов фильтрации; m — параметр, величина которого изменяется в интервале от 1 до 2.

В настоящее время этой формулой почти не пользуются вследствие непостоянства параметра m и трудности его определения по данным опытов.

Формула Смрекера имеет формальный характер и лишена физического обоснования.

4. Возможны и другие формы нелинейных зависимостей. Так, например, автор получил приведенную ниже формулу для трещиноватой породы с двумя системами трещин. Первая система тонких трещин характеризуется отклонениями от закона Дарси только при высоких градиентах, вторая — большим раскрытием и возникновением фильтрации по квадратичному закону при сравнительно малых градиентах:

$$u = a_3 I + a_4 \sqrt{I}, \quad (3.29)$$

где a_3 и a_4 — параметры.

Сущность этой формулы, близкой к зависимости Прони, очевидна.

Переход закона фильтрации от линейной зависимости к нелинейной при увеличении градиента напора происходит неодинаково у различных пород.

У рыхлых пород переход сравнительно медленный и постепенный, у слабопроницаемых рыхлых пород даже при высоких градиентах может не наблюдаться еще квадратичной зависимости; у щелей с гладкими стенками имеет место резкий переход от линейной зависимости к квадратичной или близкой к ней; для щелей с шероховатыми стенками характерен более постепенный переход.

У трещиноватых пород с трещинами различной проводимости переход также преимущественно постепенный, так как турбулентное движение развивается первоначально в трещинах с большим раскрытием. У пород, пересеченных однообразными трещинами, переход может быть резким при почти не выраженной промежуточной зависимости. Но такие породы мало распространены; примером их иногда являются основные эффузивы четвертичного возраста (базальты и т. п.).

У закарстованных пород при незаполненных карстовых каналах переход также резкий, такой же, как при движении воды по трубам.

Автор рекомендует для обычных гидрогеологических расчетов (определения водопритока в различные выработки, производительности скважин, потерь на фильтрацию в основании гидротехнических сооружений и т. п.) при возможности отклонений от закона Дарси производить расчеты по формулам, основанным на квадратичной зависимости Шези — Краснопольского.

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Неустановившемуся движению подземных вод свойственно изменение во времени гидравлических характеристик водоносных горизонтов: напора, скорости движения и расхода воды, а у безнапорных вод также высотного положения свободной водной поверхности.

Неустановившееся движение подземных вод имеет всеобщий характер, но проявления его могут быть слабыми в случае постоянного режима водоносных горизонтов, при котором гидрогеологические расчеты по зависимостям установившегося движения вообще приближенные и не дают значительных ошибок.

В настоящее время почти все ответственные гидрогеологические расчеты производятся по зависимостям неустановившегося движения или по формулам, учитывающим его путем введения изменяющихся во времени параметров. Это относится к прогнозу водопритоков в горные выработки, оценке эксплуатационных запасов подземных вод, прогнозу подпора грунтовых вод в районах водохранилищ, гидрогеологическим расчетам дренажей и

т. д. Поэтому определение фильтрационных параметров, характеризующих неустановившееся движение подземных вод, представляет собой одну из существенных задач изучения фильтрационных свойств горных пород.

Зависимости неустановившегося движения подземных вод имеют также большое значение для проведения опытных гидрогеологических работ и служат основой для таких простых и быстрых методов, как определения фильтрационных параметров по восстановлению уровня.

Наконец, зависимость неустановившегося движения подземных вод дает возможность определять пустотность горных пород в их естественном залегании, что очень существенно для трещиноватых и закарстованных пород.

Неустановившееся движение напорных вод характеризуется упругим режимом фильтрации, обусловленным сжимаемостью воды (или другой жидкости) и упругими свойствами твердого скелета породы. Эти процессы проявляются слабо, и лет 20—30 назад ими пренебрегали. Только на основании трудов американского физика М. Маскета [100], а в СССР В. Н. Щелкачева [170], И. А. Чарного [157] и других исследователей, изучавших глубоко залегающие горизонты с водой и нефтью, выяснилось большое значение этих факторов. Уравнения упругого режима, применявшиеся первоначально в области нефтепромысловой геологии, стали также широко использоваться в гидрогеологии.

М. С. Хантушем и Н. Р. Джекобом [152], а в СССР В. М. Шестаковым и Ф. М. Бочевеком [115] были получены и проинтегрированы уравнения неустановившегося движения подземных вод с учетом перетока из смежных горизонтов через разделяющие слабопроницаемые пласты; полученные формулы также приобрели большое значение.

Неустановившееся движение безнапорных вод вызвано частичным осушением или насыщением водой пород в зоне изменения высотного положения свободной водной поверхности, вызванного искусственными факторами (при откачках, нагнетаниях, дренаже, подпоре грунтовых вод и т. п.) или естественными режимными колебаниями.

Уравнения упругого режима фильтрации почти одинаковы с приближенными уравнениями неустановившегося движения безнапорных вод, применимыми при некоторых ограничениях.

§ 3.5. Дифференциальные уравнения

Неустановившееся движение напорных вод характеризуется следующим основным дифференциальным уравнением, описывающим изменения давления p в пространстве, т. е. зависимость его от всех трех координат x , y и z и времени t :

$$\chi \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.30)$$

Путем преобразования уравнения (3.30), аналогичного выполненному для дифференциального уравнения (3.8), получаются уравнения для радиального потока подземных вод, в частности выражение (3.31) для плоского радиального потока, имеющее существенное значение для определения параметров по данным исследования скважин:

$$\chi \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (3.31)$$

где χ — коэффициент пьезопроводности (см. ниже); r — расстояние от оси опытной скважины (радиус-вектор).

Коэффициент пьезопроводности является основным параметром неустановившегося движения напорных вод. Величина его зависит от сжимаемости воды и объемной упругости скелета породы, что выражается формулой

$$\chi = \frac{k_{\text{п}}}{\eta (m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{п}})} = \frac{k_{\text{п}}}{\eta\beta^*}, \quad (3.32)$$

где $\beta_{\text{ж}}$ — сжимаемость (объемная упругость) воды или другой жидкости; $\beta_{\text{п}}$ — аналогичная величина для скелета проницаемой породы (относительное изменение пористости при повышении или понижении давления); m — абсолютная (полная) пористость (см. § 4.6); $\beta^* = m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{п}}$ — упругость пласта.

Дифференциальные уравнения неустановившегося движения подземных вод одинаковы с хорошо изученными уравнениями теплопроводности для нестационарного теплового потока. Поэтому решение ряда задач неустановившегося движения подземных вод имеется в теории теплопроводности. Применение этих решений требует замены коэффициента температуропроводности коэффициентом пьезопроводности, теплоемкости упругостью и распределения температуры в нагреваемом или охлаждающемся теле распределением давления.

Уравнения неустановившегося движения напорных вод по аналогии называют также уравнениями пьезопроводности.

При измерении $k_{\text{п}}$ в дарси, η в сантипуазах и $\beta_{\text{ж}}$ и $\beta_{\text{п}}$ в квадратных сантиметрах на килограмм-силу формула (3.32) дает величину χ в квадратных сантиметрах в секунду (более удобно для расчетов, особенно если χ определяется по данным полевых опытных работ, выразить в квадратных метрах в сутки).

Величина $\beta_{\text{ж}}$ для пресной воды при температуре от 15 до 60° С может быть принята равной $4,5 \cdot 10^{-5}$ см²/кгс (при давлении до 70 кгс/см²) [170]. Значения $\beta_{\text{ж}}$ для вод различной минерализации, а также содержащих растворенный газ и при температуре и давлении, больших указанных выше, можно определить по графикам и эмпирическим формулам, приведенным в книге В. Н. Щелкачева [170] и других руководствах.

Величина $\beta_{\text{п}}$ изменяется в более широких пределах, чем $\beta_{\text{ж}}$: от $0,5 \cdot 10^{-5}$ см²/кгс для пород, состоящих из твердых минералов,

до $(3 \div 4) 10^{-5}$ см²/кгс для пород, содержащих значительное количество непрочных частиц (слюды, хлорита, лимонита, глинистых минералов и т. п.), или пород, сцементированных мягким цементом (глинистым, мергелистым и т. п.). Соответственно возможным пределам изменения сжимаемости воды и скелета породы коэффициент упругоэластичности обычно варьирует в пределах от $0,8 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-5}$ см²/кгс. Коэффициент пьезопроводности может изменяться в широких пределах соответственно разным значениям проницаемости пород. Чаще всего величина χ заключается в интервале $10^3 - 10^6$ см²/сек ($10^4 - 10^8$ м²/сутки).

Дифференциальные уравнения неустановившегося движения безнапорных вод вообще являются нелинейными и поэтому не имеют точного аналитического решения. Линеаризация этих уравнений приводит их к виду, аналогичному формуле для напорных вод, причем решения полученных линейных дифференциальных уравнений, хотя и являются приближенными, но приемлемы для многих гидрогеологических расчетов [123].

Таким образом получено уравнение для планового радиального потока

$$a_y \left(\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3.33)$$

где $a_y = \frac{kh_{cp}}{\phi}$ — коэффициент уровнепроводности; ϕ — коэффициент водоотдачи или недостатка водонасыщения, величина которых приближенно считается одинаковой.

Величина коэффициента уровнепроводности очень разнообразна, что обусловлено широким диапазоном проницаемости горных пород с безнапорными водами, а для трещиноватых пород также их малой пустотностью. Чаще всего величина a_y находится в пределах от 5 до 10^5 м²/сутки.

Для планового радиального неустановившегося движения подземных вод при наличии перетока при тех же условиях, что для приведенного выше уравнения Н. К. Гиринского [43], М. С. Хантушем и Н. Р. Джекобом получено следующее дифференциальное уравнение [115, 152]:

$$\chi \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} - \zeta S \right) = \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (3.34)$$

где χ — коэффициент пьезопроводности основного водоносного горизонта, из которого производится откачка. (Обозначения М. С. Хантуша изменены. В его работе рассматривается случай перетока только со стороны почвы горизонта.)

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ИХ СУЩНОСТЬ И ОБОСНОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОРОДНЫХ ПОРОД ПУСТОТНОСТЬ И ПОРИСТОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД.

ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

§ 4.1. Пустотность и пористость

В данном параграфе дается более подробное рассмотрение пустотности и пористости различных пород, дополняющее основные сведения, приведенные в первой части книги (см. § 4.1).

Пустотность и пористость горных пород по существу не являются фильтрационными параметрами, но их величины входят в основные зависимости неустановившегося движения подземных вод и имеют значение для ряда гидрогеологических расчетов.

У обломочных пород различают следующие виды пористости [40]: 1) полную или абсолютную, называемую также коэффициентом пористости, соответствующую общему объему пор, в том числе и замкнутых, не сообщающихся друг с другом; 2) открытую, соответствующую только порам, сообщающимся друг с другом.

У нецементированных (рыхлых) пород открытая и абсолютная пористость одинаковы; вообще у обломочных пород высокой и средней проницаемости они почти всегда очень близки друг к другу. Пористость рыхлых грубозернистых пород, содержащих очень малое относительное количество связанной воды (галечников, гравия, крупно- и среднезернистых песков), можно считать равной их водоотдаче;

3) эффективную, соответствующую части объема порового пространства, в пределах которой происходит движение воды, т. е. равную открытой пористости, уменьшенной на величину относительного объема «мертвых зон» с практически неподвижной водой и объема молекулярно-связанной воды.

Понятие эффективная пористость несколько неопределенно, поскольку переход к мертвым зонам и к пленкам молекулярно-связанной воды происходит постепенно. Кроме того, вода в мертвых зонах поровых пространств и молекулярно-связанная не совсем неподвижна.

Если пренебречь объемом воды, находящейся в «тупиковых зонах», а учитывать только объем связанной воды, то эффективную пористость можно считать очень близкой к коэффициенту водоотдачи или к почти равному ей коэффициенту недостатка насыщения.

Поровые каналы по размеру сечения условно разделены на следующие группы [40]:

- 1) сверхкапиллярные — размер больше 0,5 мм;
- 2) капиллярные — от 0,5 до $2 \cdot 10^{-4}$ мм (до 0,2 мкм);
- 3) субкапиллярные — менее $2 \cdot 10^{-4}$ мм.

По сверхкапиллярным каналам вода и другие жидкости движутся свободно, по капиллярным движение воды может быть затруднено действием капиллярных сил (преимущественно в зоне аэрации, где эти силы проявляются на поверхностях раздела воды и воздуха).

В субкапиллярных каналах находится почти исключительно молекулярно-связанная вода, которая при малых градиентах, имеющих место в природных условиях, почти неподвижна.

Для трещиноватых и закарстованных пород для относительного объема пустот наряду с терминами «трещинная или карстовая пустотность» употребляют также выражения «коэффициенты трещиноватости и закарстованности», причем выделяют открытую трещиноватость и закарстованность, соответствующие только объему незаполненного пространства трещин и карстовых полостей.

Указанное выше подразделение поровых каналов по размерам сечения применимо и для трещин. Так, волосные трещины с раскрытием менее $2 \cdot 10^{-4}$ мм содержат только связанную воду; водоотдача трещиноватых пород, пересеченных лишь тонкими трещинами, близка к нулю. Вообще же водоотдачу трещиноватых пород с высокой и средней проницаемостью, а также закарстованных пород обычно принимают равной их пустотности.

Горные породы с более чем одним видом пустот характеризуются, очевидно, суммарной пустотностью. Однако у довольно часто встречающихся пористых пород, обладающих также трещиноватостью, трещинной пустотностью в большинстве случаев можно пренебречь как относительно малой. Но условия движения воды в таких породах усложняются, особенно существенно при неустановившемся режиме [31].

§ 4.2. Коэффициенты проницаемости и фильтрации, зависимость их от величины и характера пустотности

Проницаемость горных пород при линейном законе фильтрации обратно пропорциональна удельной поверхности стенок проводящих каналов и, следовательно, зависит от их размеров и формы.

1. У рыхлых пород характер зависимости проницаемости от характерных размеров пустот или размеров частиц, образующих эти пустоты, можно получить путем рассмотрения схематической модели, представляющей собой совокупность шариков определенного диаметра с различной плотностью укладки. Обобщенное выражение линейного закона фильтрации для такой модели, полученное еще в 1897 г. С. Сликтером, имеет вид [171]

$$u = Sl \frac{d_3^2}{\eta} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (4.1)$$

где Sl — безразмерный параметр *, являющийся функцией пористости и зависящий также от структуры порового пространства, формы частиц и степени шероховатости их стенок; d_s — эффективный диаметр частиц, рассчитываемый разными способами, имеющими целью переход от реальной рыхлой породы к указанной выше модели.

Формула (4.1) является основой большинства зависимостей для определения коэффициента фильтрации по гранулометрическому составу.

2. Идеальная схематическая модель трещиноватой породы (однородной и изотропной) была описана выше (см. § 3.4) [61] и имеет следующее выражение для k (при плоских трещинах с гладкими стенками):

$$k = \frac{1}{6} \cdot \frac{\gamma g}{\eta} \frac{b^3}{l} = \frac{1}{12} m \frac{\gamma g}{\eta} b^2, \quad (4.2)$$

где $m = 2b/l$ — трещинная пустотность, рассчитанная по площади, т. е. отношение суммарной площади незаполненного пространства трещин к площади поперечного сечения потока трещиновод; l — расстояние между трещинами.

Формула (4.2) действительна не только для поперечного сечения, параллельного одной из систем взаимно перпендикулярных трещин, но и для сечения любой ориентировки.

При турбулентном движении, подчиняющемся квадратичному закону фильтрации, средняя скорость движения воды по извилистой трещине с шероховатыми стенками, согласно Г. М. Ломизе [94], определяется формулой

$$u = \sqrt{\frac{g b l}{s}} \left(2,6 + 5,1 \lg \frac{b}{2e} \right), \quad (4.3)$$

где g — ускорение силы тяжести; e — абсолютная шероховатость; s — коэффициент извилистости.

Для модели трещиноватой породы аналогично формуле (4.2) при квадратичном законе фильтрации получается зависимость

$$k_{\tau} = m \sqrt{\frac{g b}{s}} \left(2,6 + 5,1 \lg \frac{b}{2e} \right). \quad (4.4)$$

3. Закарстованные породы могут быть представлены схематической моделью в виде непроницаемого тела, пересеченного параллельными цилиндрическими ходами и гладкими стенками и постоянным диаметром.

На основании формулы Пуазейля для ламинарного движения жидкости по трубе коэффициент фильтрации такой модели выражается формулой

$$k = \frac{1}{32} \cdot \frac{g \gamma}{\eta} m d^2, \quad (4.5)$$

* Обозначение Sl предложено в честь С. Сликхера акад. Л. С. Лейбензона [94].

где $m = \frac{\pi n d^2}{4F}$ — карстовая пустотность (коэффициент открытой закарстованности); n — число карстовых каналов на площади F .

Формула (4.5) показывает, что для закарстованных горных пород, так же как и для трещиноватых, проницаемость определяется преимущественно проводимостью каналов с большим диаметром.

Для закарстованных пород имеет большое значение величина коэффициента водопроницаемости при квадратичном законе фильтрации k_T . Таким же путем, как формула (4.4), для k_T получена следующая зависимость, основанная на известной формуле Шези для труб и открытых русел:

$$k_T = m \sqrt{\frac{2gd}{\lambda}}, \quad (4.6)$$

где m — карстовая пустотность, рассчитываемая по площади; λ — безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от шероховатости стенок, их очертания и т. п. (для труб λ изменяется в пределах от 0,02 до 0,03, для карстовых каналов, по видимому, может достигать 0,04—0,05).

Формулы (4.4), (4.5) и (4.6) не предназначены для проведения определенных практических гидрогеологических расчетов, поскольку входящие в них исходные величины (раскрытие трещин, диаметр карстовых каналов и др.) надежно определить очень трудно. Значение этих формул заключается в количественном выражении общих закономерностей, четкое представление о которых необходимо при изучении фильтрационных свойств трещиноватых и закарстованных пород.

§ 4.3. Обоснование зависимостей для определения коэффициента фильтрации или проницаемости по данным исследования одиночных скважин

I. Проницаемость горных пород по данным откачек из гидродинамически совершенных скважин определяется по широко известным формулам Дюпюи, приведенным ниже:

для напорных вод

$$k = \frac{0,366Q (\lg R - \lg r_c)}{MS_c}; \quad (4.7)$$

для безнапорных вод

$$k = \frac{0,73Q (\lg R - \lg r_c)}{S_c (2H - S_c)}, \quad (4.8)$$

где Q — расход воды; R — радиус депрессионной воронки (радиус влияния); S_c — понижение уровня в скважине; M — мощность напорного водоносного горизонта; H — мощность безнапорного водоносного горизонта; r_c — радиус водоприемной части (фильтра) скважины.

Для напорно-безнапорных условий, т. е. откачки из напорного горизонта с понижением уровня в опытной скважине ниже кровли горизонта,

$$k = \frac{0,73Q (\lg R - \lg r_c)}{(2H_1 - M) M - H_c^2}, \quad (4.9)$$

где H_1 — высота статического пьезометрического уровня над горизонтальным водоупорным ложем; $H_c = H - S_c$ — то же, для динамического уровня.

Формула (4.9) представляет собой следствие зависимостей Дюпюи для безнапорного движения (во внутренней части депрессионной воронки) и напорного (во внешней ее части).

По поводу приведенных формул следует высказать следующие замечания.

1. Формулы являются точными для скважины, находящейся в центре окружности радиуса R , представляющей собой границу области питания с постоянным напором. Такие условия маловероятны, почему при границе с постоянным напором другого очертания R является приведенным радиусом питания, преобразующим в окружность существующую границу.

При отсутствии явно выраженной границы области питания R представляет собой условный или расчетный радиус депрессионной воронки (радиус влияния), находимый по одной из зависимостей, приведенных в § 4.7.

2. Входящий в формулу Дюпюи радиус водоприемной части скважины r_c нередко не равен номинальному радиусу ее, соответствующему размеру бурового инструмента. Увеличение r_c может быть вызвано суффозией, размывом и обвалами неустойчивых пород, что ведет к уменьшению входных фильтрационных сопротивлений. Противоположные процессы, вызывающие увеличение входных сопротивлений (кольматация пород, засорение фильтра и т. п.), равносильны уменьшению радиуса r_c . Дополнительные входные сопротивления, возникающие у несовершенных скважин, можно также количественно охарактеризовать уменьшением r_c . И. А. Чарным и другими исследователями было предложено выразить изменение входных сопротивлений заменой r_c приведенным радиусом рабочей части скважины $r_{c, пр}$ [157]. При увеличении входных сопротивлений $r_{c, пр} < r_c$, при уменьшении — $r_{c, пр} > r_c$.

Неправильный учет или неучет отклонения величины r'_c от ее номинального значения является одной из главных причин ошибок при определении проницаемости по данным исследования одиночных скважин. Неточности величины R имеют обычно меньшее значение, так как возможные относительные изменения $\lg R$, как правило, невелики.

3. Формула (4.8) для безнапорных вод является гидравлической, не учитывающей вертикальной составляющей скорости фильтрации. Поэтому раньше считалось, что применять эту

формулу допустимо только при понижении уровня в скважине, не превышающем половины мощности водоносного горизонта. Однако И. А. Чарный доказал, что подстановка в формулу (4.8) понижения уровня не за фильтром, а в скважине не вызывает ошибки при определении коэффициента фильтрации при любых понижениях * [157].

Установка затрубной скважины, или пьезометра, рекомендуемая в некоторых ведомственных инструкциях, дает удовлетворительные результаты только при оборудовании этой скважины коротким (теоретически — точечным) фильтром, устанавливаемым у водоупорного ложа, где линии тока имеют горизонтальное направление. Если же фильтр

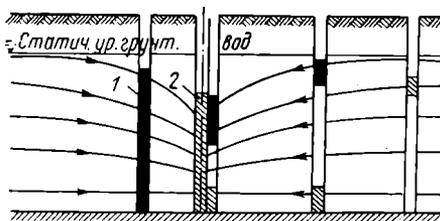


Рис. 4.1

Схема установки фильтров в безнапорном водоносном горизонте.

Положение фильтра: 1 — неправильное; 2 — правильное.

затрубной скважины находится в верхней части водоносного горизонта или захватывает большую часть его мощности, то уровень воды в ней устанавливается выше, чем в опытной, и расчеты коэффициента фильтрации на основании этого уровня дают завышенные результаты, особенно при больших понижениях. Изложенное иллюстрируется рис. 4.1. Вместо затрубной скважины для устранения ошибок, возникающих при засорениях фильтра или вследствие его неудовлетворительной работы, лучше пробурить одну наблюдательную на расстоянии 1—2 м от опытной, как это показано на том же рис. 4.1.

При наличии перетока из других горизонтов через разделяющие слабопроницаемые пласты в кровле и почве коэффициент фильтрации может быть определен по формуле Н. К. Гиринского [43]:

$$k = \frac{Q}{2\pi M S_c} \cdot \frac{K_0(r_c \sqrt{\xi})}{K_1(r_c \sqrt{\xi})}, \quad (4.10)$$

где ξ — коэффициент связи (параметр перетекания); K_0 и K_1 — обозначение функций Бесселя от мнимого аргумента, соответственно нулевого и первого порядков.

Формула (4.10) представляет собой результат интегрирования дифференциального уравнения (3.11), приведенного выше.

II. Коэффициент фильтрации (проницаемости) по данным исследования одиночных гидродинамически несовершенных скважин

* Очевидно, что при плохом качестве фильтра или засорении его, вызывающих дополнительные потери напора, уровень воды в опытной скважине не может быть использован для расчета коэффициента фильтрации.

определяется по формулам, имеющим в самой общей форме вид

$$k = \frac{Q}{S_c} \rho_\phi, \quad (4.11)$$

где ρ_ϕ — фильтрационное сопротивление.

Формулу Дююи можно рассматривать как частный случай выражения (4.11), у которого при напорных водах

$$\rho_\phi = \frac{0.366 (\lg R - \lg r_c)}{M}$$

Величина фильтрационного сопротивления у несовершенных скважин ρ_ϕ больше, чем у совершенных, вследствие искривления и сгущения сетки движения при подходе к водоприемной части несовершенной скважины.

Величина ρ_ϕ зависит от длины, вида и положения фильтра, радиуса водоприемной части скважины, мощности водоносного горизонта и радиуса депрессивной воронки R . При большой мощности водоносного горизонта он считается неограниченным, и его величина не входит в приближенные формулы для определения коэффициента фильтрации, так же как величина M .

Из значительного числа формул, предложенных для несовершенных скважин, ниже рассматриваются только достаточно обоснованные и не очень сложные. Значительно более полные сводки формул для определения проницаемости по данным исследования несовершенных скважин имеются в справочниках и руководствах по гидрогеологии [143, 144].

По мнению автора, применение для несовершенных скважин сложных формул неоправданно. Соответствуя однородной и изотропной среде, сложные формулы являются абстрактными и дают такие же, а иногда и большие погрешности для реальных горных пород, что и простые формулы, поскольку породы всегда в известной степени неоднородны и нередко анизотропны.

Наиболее простой и широко применяемой является формула Гиринского — Бабушкина:

$$k = \frac{0.366Q}{S_c l_c} \lg \frac{\alpha l_c}{r_c}, \quad (4.12)$$

где l — длина фильтра; α — коэффициент, в среднем равный 1,46 (по Н. К. Гириному — 1,6, по В. Д. Бабушкину — 1,32).

Формула применима при примыкании фильтра к кровле или почве напорного горизонта или почве безнапорного горизонта (рис. 4.2), причем длина фильтра не должна превышать 25—30% мощности напорного горизонта или глубины безнапорного, соответствующей динамическому уровню в скважине [15].

Формула (4.12) при коэффициенте $\alpha = 0,7$ применима также для скважины с фильтром, расположенным в середине безнапорного и напорного горизонтов; в данном случае длина фильтра также не должна превышать 25—30% мощности горизонта.

Формула (4.12) и некоторые другие формулы получены методом линейных стоков, заключающимся в том, что опытная скважина рассматривается как линейный сток, представляющий собой бесконечное число точечных стоков, каждый из которых имеет расход dQ и вызывает на расстоянии ρ понижение напора dS , равное

$$dS = \frac{dQ}{4\pi k r \rho}. \quad (4.13)$$

Интегрирование этого уравнения после перехода к цилиндрическим координатам позволяет определить понижение уровня в любой точке пространства, в частности около поверхности фильтра, где, однако, необходимо введение переходного коэффициента α , так как эквипотенциальная поверхность отклоняется от цилиндрической.

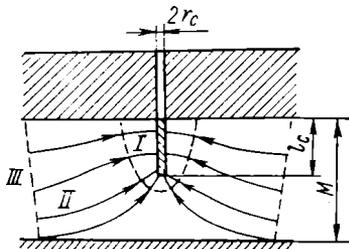


Рис. 4.2

Схема притока воды к гидродинамически-несовершенной скважине, по Н. И. Биндеману [15].

Зона: I — значительной деформации линий тока; II — переходная; III — движения подземных вод, близкого к плановому радиальному.

В формуле (4.12), кроме того, произведен переход от гиперболических функций к логарифму, допустимый при значительной величине отношения l_c/r_c .

В глубоких скважинах роторного и турбинного бурения водоносные горизонты вскрываются посредством перфорации обсадных труб. При исследовании горизонта поэтому приходится учитывать два вида гидродинамического несовершенства скважины: по характеру вскрытия, вызванное фильтрационными сопротивлениями при подходе воды к отверстиям перфорации, и часто, кроме того, по степени вскрытия, обусловленное перфорацией труб на протяжении, меньшем мощности пласта.

Для определения коэффициента фильтрации в данном случае служит формула Дюпюи, дополненная двумя безразмерными величинами c_1 и c_2 , учитывающими указанные два вида несовершенства:

$$k = \frac{0.366 (\lg R - \lg r_c + c_1 + c_2)}{MSc}. \quad (4.14)$$

Величина c_1 определяется на основании зависимостей для притока воды к скважинам, несовершенным по степени вскрытия, предложенных М. Маскетом [100], М. Хантушем [152] и Н.Н. Веригиным и В. Н. Николаевским [29]. Поскольку эти зависимости выражаются рядами, для практических расчетов служат графики, таблицы или приближенные формулы, приведенные в различных руководствах и инструкциях [29, 143, 144].

Наиболее удобна расчетная схема, приведенная в книге Н. Н. Веригина [29], где величина дополнительного безразмер-

Таблица 4.1

Значения ζ^* , по Н. В. Веригину [29]

l_c/M	M/r^{**}									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	$4,23 \cdot 10^{-3}$	0,135	2,3	12,6	35,5	71,9	94	126	149	169
0,1	$3,91 \cdot 10^{-3}$	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	68,5	79,6	90,9
0,3	$2,97 \cdot 10^{-3}$	0,091	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,049	0,66	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	$5,46 \cdot 10^{-4}$	0,017	0,24	0,88	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	$4,8 \cdot 10^{-5}$	0,0015	0,025	0,13	0,3	0,53	0,67	0,85	0,98	1,12

* Значения ζ вдвое больше величины s_1 в формуле (4.14). Для одиночной скважины величина ζ может также определяться по приближенной формуле

$$\zeta = 2 \left(\ln \frac{M}{l_c} - 1 \right) \left(\ln 1,47 \frac{l_c}{r_c} - 2,65 \frac{l_c}{M} \right).$$

** Индекс u не показан, так как данные таблицы применимы также для наблюдательных скважин.

ного сопротивления $\zeta = 2s_1$, являющегося функцией отношений M/r_c и l_c/M , дана в табл. 4.1.

Решение Н. Н. Веригина применимо также для безнапорных вод, если в формуле (4.14), не содержащей величины s_2 , умножить числитель на 2, а знаменатель MS_c заменить величиной $S_c(2H - S_c)$.

Значение s_2 зависит от количества отверстий перфорации, приходящихся на 1 м скважины, диаметра отверстий и углубления их в породу. Эта величина может быть определена по графикам В. И. Щурова, полученным им посредством электро моделирования и помещенным в ряде руководств [145].

И. А. Чарным на основании данных В. И. Щурова предложена следующая приближенная формула для определения s_2 [157]:

$$s_2 = \frac{348\varepsilon}{n d \bar{h}}, \quad (4.15)$$

где ε — коэффициент, учитывающий углубление пуль в породу (при отсутствии углубления ε принимается равным 0,4, при углублении и особенно при образовании каверн у отверстий ε уменьшается до 2—3 раз); d — диаметр отверстий; n — число отверстий на 1 м; $\bar{h} = l_c/M$.

Величина s_2 нередко получается очень неточной, так как углубление пуль в породу может быть оценено только предположительно, к тому же часть прострелов не вскрывает исследуемого пласта.

Удельное водопоглощение (УВП), как было указано выше (см. § 1.1), представляет собой ориентировочную характеристику проницаемости трещиноватых пород.

На основании величины удельного водопоглощения q для насыщенных водой пород можно приблизительно определить коэффициент фильтрации следующим образом:

1) для пород изотропных — по формуле Бабушкина (4.12), которая при обычном измерении УВП в литрах в минуту и k в метрах в сутки приобретает вид [15]

$$k = 0,525q \lg \frac{0,7l_c}{r_c}, \quad (4.16)$$

где l_c — длина интервала нагнетания;

2) для предельно анизотропных пород с проницаемостью в одном направлении (обычно нормальном к слоистости), близком к нулю, — по формуле Дюпюи, при указанных выше единицах измерения имеющей вид

$$k = 0,525q (\lg R - \lg r_c). \quad (4.17)$$

Часто при невозможности судить о наличии степени фильтрационной анизотропии рассчитывают среднее из значений коэффициента фильтрации, полученных по формулам Бабушкина и Дюпюи [55];

3) определение коэффициента фильтрации по данным нагнетания в зоне аэрации не рекомендуется, так как движение воды здесь сложно и не поддается учету. Так, например, в этой зоне может происходить безнапорное движение воды книзу по крутопадающим трещинам с высокой проводимостью.

Коэффициент фильтрации однородных трещиноватых пород при отсутствии трещин со значительной водопроводимостью может быть определен в зоне аэрации посредством наливов в короткие интервалы и расчета по формуле Насберга, при выводе которой допущено, что движение воды из скважины происходит без подпора [123]:

$$k = 0,423 \frac{Q}{l_c^2} \lg \frac{2l_c}{r_c}. \quad (4.18)$$

Формула применима при условии

$$12,5 < \frac{l_c}{r_c} < 50.$$

Данные по одиночной скважине могут служить для ориентировочного суждения о фильтрационной анизотропии трещиноватых пород, которую вообще охарактеризовать очень трудно. Сущность метода (предложенного автором) заключается в сопоставлении данных поинтервальных нагнетаний и суммарного для протяжения скважин, охватывающих всю (или большую часть) изучаемую толщу или трещиноватую зону, исследованную по интервалам. Длина интервалов должна быть примерно одинаковой (около 5 м).

О степени фильтрационной анизотропии можно судить по величине отношения

$$A_1 = \frac{\sum q_i/n}{q_b}, \quad (4.19)$$

где $\sum q_i/n$ — среднее УВП для изучаемой толщи; q_b — УВП при суммарном нагнетании или наливе.

У изотропных пород A_1 обычно порядка 1,5—2,5. У слоистых анизотропных пород с коэффициентом фильтрации в направлении, нормальном к слоистости, во много раз меньшим коэффициента фильтрации в направлении слоистости, величина A_1 близка к единице, иногда немного больше. У сильно анизотропных пород с открытыми трещинами высокой проницаемости, параллельными скважине и соответственно максимуму проницаемости в том же направлении, величина A_1 может достигать 20 и даже более.

Достоинством рекомендуемого метода, основанного на простой формуле (4.14) и формуле Дюпюи, является отсутствие необходимости в бурении наблюдательных скважин и проведении дополнительных видов опытных работ. Между тем точные гидромеханические методы, разработанные В. Д. Бабушкиным [9] и Е. С. Роммом [133], значительно сложнее и главное соответствуют однородной анизотропной среде. Поэтому расчеты параметров фильтрационной анизотропии по точным формулам редко дают удовлетворительные результаты в реальных условиях, особенно для трещиноватых пород.

§ 4.4. Обоснование зависимостей для определения фильтрационных параметров при наличии наблюдательных скважин и по данным взаимодействия скважин

Наличие наблюдательных скважин позволяет более точно определить проницаемость горных пород, найти другие фильтрационные параметры и судить о степени постоянства исследуемого горизонта или проницаемой зоны. Наиболее полные и точные данные получают на опытных гидрогеологических кустах с несколькими наблюдательными скважинами.

I. При наличии одной наблюдательной скважины к совершенной центральной скважине формула Дюпюи для напорных вод может быть представлена так:

$$k = \frac{0,366Q (\lg r_1 - \lg r_c)}{(S_c - S_1)M} = \frac{0,366Q (\lg R - \lg r_1)}{S_1M}, \quad (4.20)$$

где r_1 и S_1 — соответственно расстояние до наблюдательной скважины от центральной и понижение уровня в наблюдательной скважине.

Первая из указанных зависимостей не содержит радиуса влияния R , что устраняет ошибки, возникающие вследствие неточности его величины. Вторая зависимость, в которую не входит r_c , позволяет избежать ошибок, являющихся результатом несоответ-

ствия значения r_c номинальному радиусу водоприемной части скважины.

Все изложенное относится и к безнапорному горизонту, для которого числитель формулы (4.20) умножается на 2, а знаменатель имеет вид $(S_c - S)(2H - S_c - S_1)$ или $S_1(2H - S_1)$. Но в данном случае имеет значение длина и положение фильтра наблюдательной скважины: в зоне значительного искривления линии тока, т. е. при $r_1 < 1,5H$, фильтр должен быть коротким и примыкать к водоупорному ложу; при $r_1 > 1,5H$ длина и положение фильтра уже почти не имеют значения, так как поток подземных вод здесь близок к плановому радиальному (рис. 4.1).

При двух наблюдательных скважинах формула Дюпюи для напорных вод имеет вид

$$k = \frac{0,366Q (\lg r_2 - \lg r_1)}{M (S_1 - S_2)}, \quad (4.21)$$

где r_1 и r_2 — расстояние до наблюдательных скважин от центральной; S_1 и S_2 — понижения уровня в наблюдательных скважинах.

Формула для безнапорных вод получается путем умножения числителя выражения (4.21) на 2 и замены знаменателя ее на выражение $(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)$. Приведенные формулы не содержат величин R и r_c и поэтому являются наиболее точными.

В случае нескольких наблюдательных скважин, т. е. для опытного гидрогеологического куста, формула (4.21) может быть применена для расчета коэффициента фильтрации по нескольким комбинациям пар наблюдательных скважин. Из полученных таким образом значений коэффициентов фильтрации принимается или среднее значение или наиболее обоснованное и соответствующее конкретным задачам исследований.

В литературе приведена зависимость для расчета коэффициента фильтрации по данным всех наблюдательных скважин в один прием [56], что несколько упрощает расчеты при большом количестве наблюдательных скважин. Однако автор считает, что лучше проводить расчеты для отдельных пар наблюдательных скважин, так как при этом создается представление о степени постоянства исследованного горизонта, выявляются дефектные наблюдательные скважины и т. п.

Если на луче опытного гидрогеологического куста находится более двух наблюдательных скважин, то рекомендуется производить построение депрессионной линии в разрезе по лучу по методу С. А. Коля [77], т. е. в координатах S и $\lg r$ для напорных вод и $S(2H - S)$ и $\lg r$ для безнапорных. Эта зависимость изображается прямой, дающей возможность просто определить коэффициент фильтрации, радиус депрессионной воронки и входные потери напора.

Коэффициент фильтрации определяется по угловому коэффициенту прямой $\operatorname{tg} \alpha$ по формуле

$$k = \frac{0,366Q}{M \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.22)$$

Поскольку масштабы для осей координат берутся произвольные, $\operatorname{tg} \alpha$ определяются из следующих выражений:

для напорных вод

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_n - S_{n+1}}{\lg r_{n+1} - \lg r_n}; \quad (4.23)$$

для безнапорных вод

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(2H - S_n - S_{n+1})(S_n - S_{n+1})}{\lg r_{n+1} - \lg r_n}, \quad (4.24)$$

где S_n и S_{n+1} — понижения для двух точек депрессионной линии, находящихся на расстоянии соответственно r_n и r_{n+1} от оси центральной скважины.

Величина $\lg R$ находится как абсцисса точек пересечения прямой с горизонтальной линией, соответствующей статическому уровню.

Входные потери напора для напорных вод представляют собой разность понижений пьезометрического уровня в скважине и за фильтром. Последнее является ординатой точки прямой с абсциссой r_c .

Входные потери напора для безнапорных вод, представляющие собой сумму гидравлического скачка и дополнительного понижения уровня, вызванного сопротивлением фильтра, находят так: из квадратного уравнения $y = S'_c(2H - S'_c)$, где y — ордината точки прямой с абсциссой r_c , определяют S'_c — понижение уровня за фильтром. Входные потери, так же как и для напорных вод, равны разности S'_c и S_c .

При построении графика по описанному методу для получения наиболее обоснованной прямой линии и соответствующих ей параметров автор рекомендует применять способ наименьших квадратов [67], что особенно существенно при разбросе точек, вызванном неоднородностью пород, погрешностями измерений и т. п.

II. При рассмотрении довольно большого числа формул, предложенных для определения проницаемости с использованием данных по наблюдательным и несовершенной скважинам, следует учитывать довольно сложную схему водопритока к последней [15].

В ближайшей к центральной скважине зоне (рис. 4.2, зона I) линии тока сильно искривлены и имеют точку перегиба. Эта зона по данным моделирования распространяется на расстояние $(1 \div 1,5) l_c$ от скважины (l_c — длина водоприемной части центральной скважины). В следующей — переходной — зоне (рис. 2.4, II) поток подземных вод постепенно приближается уже к плановому радиальному. Эта зона простирается примерно на расстоянии $(1,0 \div 1,5) M$ от скважины (M — мощность исследуемого горизонта). На еще большем расстоянии (зона III) движение подземных вод происходит практически в горизонтальном направлении, поэтому данными расположенных здесь наблюдательных скважин можно пользоваться для расчетов по формуле Дююи.

Ниже рассматриваются главнейшие формулы из числа предложенных для описываемых условий. Более полный обзор существующих формул имеется в различных руководствах и справочниках [143, 144].

Общая формула для определения проницаемости по данным откачки из пласта большой мощности (теоретически неограниченной), широко распространенного, имеет вид

$$k = \frac{Q}{4\pi l_c S} \left(\operatorname{arsh} \frac{z+l_c}{r} - \operatorname{arsh} \frac{z-l_c}{r} \right), \quad (4.25)$$

где l_c — длина фильтра, расположенного примерно в середине пласта; z и r — цилиндрические координаты точки, где понижение напора равно S (начало координат в середине фильтра).

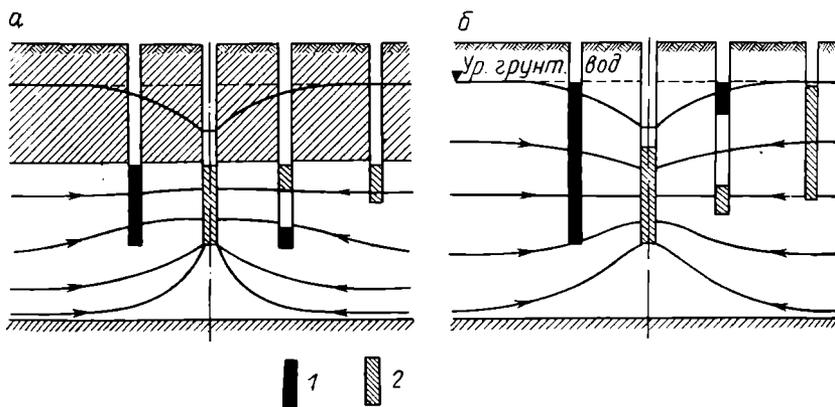


Рис. 4.3
 Схема установки фильтров для несовершенной опытной скважины в напорном (а) и безнапорном (б) горизонтах.
 Положение фильтра: 1 — неправильное; 2 — правильное.

Формула (4.25) получена методом линейных стоков С. К. Абрамовым и В. Д. Бабушкиным [3] и является приближенной, так же как основанные на ней формулы, приведенные ниже, поскольку не учитывает ограничений мощности водоносного горизонта. Эти формулы не дают существенных ошибок при мощности водоносного горизонта, в 3—4 раза большей длины фильтра центральной скважины. Необходимо также, чтобы фильтры наблюдательных скважин, расположенных в зоне значительной деформации линий тока (рис. 4.2, I), были короткими (теоретически — точечными) и находились на участках, где скорость фильтрации имеет горизонтальное направление. При примыкании фильтра центральной скважины к кровле или почве напорного горизонта таким же образом должны быть расположены фильтры наблюдательных скважин (рис. 4.3, а). При расположении фильтра центральной скважины в средней части исследуемого горизонта середина

ее фильтра и фильтров наблюдательных скважин должны быть на одном уровне (рис. 4.3, б).

Следствием формулы (4.25) является несколько приведенных ниже зависимостей, являющихся ее частными случаями.

1. Формула для одной наблюдательной скважины с фильтром, расположенным против середины фильтра центральной скважины:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_c S} \operatorname{arsh} \frac{l_c}{2r}, \quad (4.26)$$

где r — расстояние до наблюдательной скважины от центральной; S — понижение уровня в наблюдательной скважине.

Эта формула получается из выражения (4.25), если положить $z = 0$.

Формула (4.26) при $r = r_c$ после введения множителя α и перехода от гиперболического аресинуса к логарифму, что допустимо при значительной величине отношения l_c/r_c , дает приведенную выше формулу Гиринского — Бабушкина (4.12) для одиночной несовершенной скважины.

2. Для расчета коэффициента фильтрации по двум наблюдательным скважинам с фильтрами, расположенными, так же как фильтр центральной скважины, в середине водоносного горизонта ($z = 0$), формула (4.25) преобразуется в следующую:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_c (S_1 - S_2)} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_c}{2r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_c}{2r_2} \right), \quad (4.27)$$

где r_1 и r_2 — расстояния до первой и второй наблюдательных скважин от центральной; S_1 и S_2 — понижения уровня в этих скважинах.

Формула (4.27) с вдвое большим аргументом функций arsh действительна для опытного узла с центральной и наблюдательной скважинами, закрепленными фильтрами, проницаемыми к непроницаемой кровле или почве напорного горизонта.

3. Из числа формул, в которые входит мощность водоносного горизонта, удовлетворительные результаты дает формула В. М. Насберга [15]:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_c (S_1 - S_2)} \left[\operatorname{arsh} \frac{l_c}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_c}{r_2} - \frac{l_c}{M} \left(\operatorname{arsh} \frac{M}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{M}{r_2} \right) + \frac{l_c}{M} \ln \frac{r_1}{r_2} \right]. \quad (4.28)$$

4. К формуле В. М. Насберга близка формула Н. П. Аргунова [116]:

$$k = \frac{Q}{2\pi l_c (S_1 - S_2)} \left[\frac{M - l_c}{M} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_c}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_c}{r_2} \right) + \frac{l_c}{M} \ln \frac{r_1}{r_2} \right]. \quad (4.29)$$

При $M \rightarrow \infty$ эти выражения переходят в формулу (4.27), а при $l_c = M$ — в формулу Дюпюи.

Рассмотренные формулы применимы и для безнапорных горизонтов, если считать среднюю мощность (глубину) безнапорного потока в зоне I (сильно искривленных линий тока) равной, согласно Н. Г. Гиринскому,

$$H_1 = H - \frac{S_c + S_1}{2}, \quad (4.30)$$

а в более отдаленной зоне, где находится вторая наблюдательная скважина,

$$H_2 = H - \frac{S_1 + S_2}{2}, \quad (4.31)$$

где H — первоначальная мощность безнапорного горизонта, равная расстоянию по вертикали от статического уровня до водонепроницаемого ложа; S_c , S_1 и S_2 — соответственно понижения уровня в центральной (за фильтром), первой и второй наблюдательных скважинах.

Таким же образом уменьшается длина фильтров, если их верхний конец находится вблизи статического уровня безнапорных вод.

5. Формулы Н. Н. Веригина для расчетов коэффициента фильтрации при наличии наблюдательных скважин аналогичны его формулам для одиночной скважины и получены тем же путем (см. § 4.3).

Иногда коэффициент фильтрации определяется или уточняется по данным работы групп взаимодействующих скважин, например эксплуатационных для водоснабжения или добычи промышленных вод, водопонижительных и т. п.

Коэффициент фильтрации по зависимостям установившегося движения подземных вод по данным групповых откачек следует определять для периодов относительно постоянного режима работы скважин с минимальным числом и продолжительностью перерывов. В этот период дебит скважин и динамический уровень (последний лучше всего измерять в наблюдательных скважинах) не должны заметно понижаться или повышаться.

Расчетные схемы для определения коэффициента фильтрации в данном случае основываются на следующей общей зависимости, полученной еще Ф. Форхгеймером [151]:

$$k = \frac{1}{2\pi SM} \sum Q_i (\ln R - \ln \rho_i), \quad (4.32)$$

где S — понижение уровня в расчетной точке; Q_i — дебиты отдельных скважин; R — приведенный радиус депрессионной воронки, образующейся от действия группы скважин; ρ_i — расстояния до отдельных скважин от расчетной точки.

При наличии наблюдательной скважины расчетной точкой является пункт ее нахождения. Если имеется несколько наблюдательных скважин, то расчет k может быть произведен отдельно для каждой из них, т. е. в нескольких вариантах.

При отсутствии наблюдательных скважин расчетная точка может соответствовать любой работающей скважине с надежно установленным динамическим уровнем и зависимость (4.32) приобретает следующий вид:

$$k = \frac{0.366Q}{S_{сн}M} \left[\sum_{i=1}^{n-1} Q_i (\lg R - \lg r_i) + Q_n (\lg R - \lg r_c) \right], \quad (4.33)$$

где $S_{сн}$ — понижение напора на водоприемной поверхности n -й расчетной скважины; r_c — радиус водоприемной части расчетной скважины; Q_n — дебит расчетной скважины; Q_i — дебиты отдельных скважин, кроме расчетной; r_i — расстояния до отдельных скважин от расчетной.

При наличии двух наблюдательных скважин получаются следующие зависимости, позволяющие определить также R :

$$\lg R = \frac{1}{n} \cdot \frac{S_{н1} \sum_{i=1}^n \lg \rho_{i2} - S_{н2} \sum_{i=1}^n \lg \rho_{i1}}{S_{н1} - S_{н2}}; \quad (4.34)$$

$$k = \frac{0.366Q \sum_{i=1}^n \lg \rho_{i2} - \sum_{i=1}^n \lg \rho_{i1}}{M (S_{н1} - S_{н2})}, \quad (4.35)$$

где $S_{н1}$ и $S_{н2}$ — соответственно понижение уровня в первой и второй наблюдательных скважинах; ρ_{i1} и ρ_{i2} — соответственно расстояния до действующих скважин от первой и второй наблюдательных.

Формула (4.35) наиболее точная, так как в нее не входит величина радиуса водоприемной части расчетной скважины r_c , которая часто может быть установлена только очень ориентировочно.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 4.5. Обоснование зависимостей для одиночных скважин

Определение фильтрационных параметров горных пород при неустановившемся движении основываются на решениях уравнения пьезопроводности.

Наиболее простая и широко используемая зависимость, удовлетворяющая уравнению (3.34) для планового радиального потока, соответствует откачке с постоянным дебитом из напорного горизонта, распространение которого принимается неограниченным [170]:

$$S = -\frac{Q}{4\pi kM} E_i \left(-\frac{r^2}{4\gamma t} \right), \quad (4.36)$$

где S — понижение уровня на расстоянии r от оси скважины; E_i — обозначение интегральной показательной функции*; χ — коэффициент пьезопроводности; t — время от начала откачки.

Формула (4.36) (зависимость Тейса) называется В. Н. Щелкачевым основной формулой упругого режима. При $r = r_c$ она дает понижение уровня S_c на водопримемной поверхности скважины (с очень малой погрешностью при времени $t > 5 r_c^2/\chi$). Кроме того, функция E_i при малой величине аргумента $r_i^2/(4\chi t)$ может быть заменена своим приближенным выражением через натуральный логарифм, в результате чего получается

$$S_c = \frac{Q}{4\pi kM} \ln \frac{2,25\chi t}{r_c^2}. \quad (4.37)$$

Понижение уровня S_0 на расстоянии r от оси скважины после ее остановки при неустановившемся режиме (остаточное понижение) описывается следующей формулой, представляющей собой следствие зависимости (4.36), основанное на принципе суперпозиции:

$$S_0 = - \frac{Q}{4\pi kM} \left[E_i \left(- \frac{r^2}{4\chi t} \right) - E_i \left(- \frac{r^2}{4\chi (t - t_0)} \right) \right]. \quad (4.38)$$

Замена в формуле (4.38) при $r = r_c$ функции E_i ее выражением через логарифм дает следующую зависимость для понижения уровня на водопримемной поверхности скважин после ее остановки:

$$S_{c.0} = \frac{0,183Q}{kM} \lg \frac{t}{t - t_0}. \quad (4.39)$$

В формулах (4.38) и (4.39) t_0 — продолжительность откачки; t — время от начала откачки.

Приведенные формулы, как было упомянуто, получены на основании принципа суперпозиции — сложения полей. В данном случае складываются поля напора действующей скважины, работающей с постоянным дебитом, и фиктивной нагнетательной скважины, вводимой в момент остановки действующей скважины в том же пункте и работающей с тем же дебитом.

При продолжительной откачке, в конце которой движение подземных вод можно считать практически установленным, повышение уровня после остановки скважины Δh_c , отсчитываемое от динамического уровня в конце откачки, определяется такой же зависимостью, как формула (4.37), соответствующей фиктивной нагнетательной скважине [170]:

$$\Delta h_c = \frac{0,183Q}{kM} \left(\lg \frac{2,25\chi}{r_c^2} + \lg t \right). \quad (4.40)$$

Зависимость Δh_c от $\lg t$, изображенная графически (рис. 4.4), на основании формулы (4.40) представляет собой прямую линию

* Функция E_i табулирована во многих справочниках [173].

с угловым коэффициентом $i = \frac{0,183Q}{k\mu}$. Поэтому построение графика зависимости (4.40) в координатах Δh_c и $\lg t$ дает возможность определить водопроводимость пласта kM и при известной мощности его M коэффициент фильтрации по формуле [170]

$$k = \frac{0,183Q}{iM}, \quad (4.41)$$

где $i = \operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона прямой на графике.

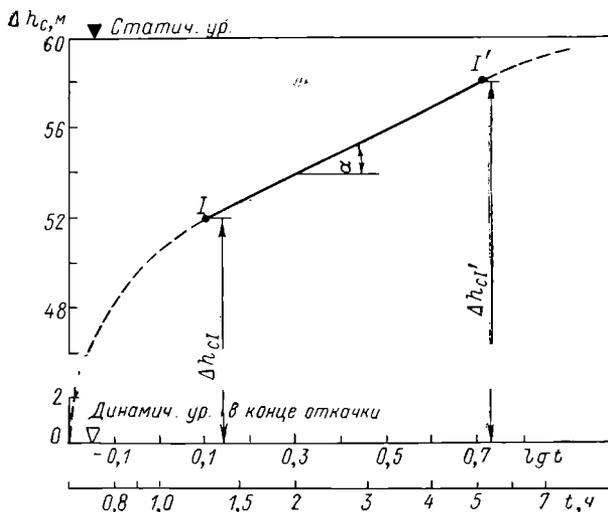


Рис. 4.4

График восстановления уровня для определения фильтрационных параметров после прекращения длительной откачки.

$I-I'$ — начало и конец прямолинейного отрезка графика; $\operatorname{tg} \alpha = i = (58 - 52)/(0,7 - 0,1) = 10,0$ м; $S_c = 60,0$ м.

Поскольку на этом графике масштабы для Δh_c и $\lg t$ берутся произвольно, i следует рассчитывать по формуле

$$i = \frac{\Delta h_{c2} - \Delta h_{c1}}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (4.42)$$

где Δh_{c1} и Δh_{c2} — повышения пьезометрического уровня для двух точек прямой, соответствующих времени t_1 и t_2 от момента остановки скважины.

Коэффициент пьезопроводности χ определяется путем подстановки в формулу (4.42) рассчитанного значения k и решения полученного уравнения первой степени, что рекомендуется для контроля делать дважды при двух различных величинах Δh_c и t .

По поводу определения коэффициента пьезопроводности необходимо сделать следующие замечания.

1. Рекомендуемый в некоторых работах способ определения коэффициента пьезопроводности по начальной ординате прямой линии, соответствующей уравнению (4.40), принципиально правилен, но на практике дает часто большие ошибки, так как экстраполяция прямой до ординаты при абсциссе $\lg t = 0$ при небольших неточностях определения $\operatorname{tg} \alpha$ дает существенные погрешности начальной ординаты и величины k .

2. При определении коэффициента пьезопроводности на основании формулы (4.40) первоначально находится величина $\lg (2,25\chi/r_c^2)$, а затем после подстановки в нее значения r_c величина χ . Для несовершенных скважин, а также при нарушении или закольматированности пород в приствольной (призобойной) зоне в выражение $\lg (2,25\chi/r_c^2)$ следует подставлять приведенный радиус водоприемной части скважины $r_{c, \text{пр}}$. Однако это не исключает получения очень неточных значений χ , поскольку расчет $r_{c, \text{пр}}$ для несовершенных скважин дает удовлетворительные результаты только для однородной и изотропной среды, а влияние нарушения пород или неполной деглинизации их вообще не поддается количественной оценке. Поэтому имеют большое значение гидродинамические методы нахождения $r_{c, \text{пр}}$, как, например, метод Томаса [158], рассмотренный ниже.

Линия зависимости (4.40) в полулогарифмическом масштабе не является прямой на всем своем протяжении. На начальном участке этой линии отклонения от прямой обычно вызваны мгновенной остановкой скважины, обусловленной при самоизливе временем закрытия задвижки, при откачке — заполнением междутрубного пространства и частично насосных труб (при компрессионной откачке).

Нарушение естественной структуры пород вблизи водоприемного участка во время бурения и при освоении скважин также влияет на начальный участок рассматриваемой линии: при повышении проницаемости вследствие суффозии и размыва пород уклон линии здесь уменьшается, а при понижении проницаемости за счет кольматации и сопротивлений фильтра увеличивается. При этом могут наблюдаться небольшие прямолинейные участки зависимости Δh_c от $\lg t$ с другим уклоном, чем у основного прямолинейного участка. Однако такие участки обычно выражены неявно и соответствуют небольшим промежуткам времени. Основной же прямолинейный участок для пористых пород, как правило, соответствует продолжительности не менее 1—2 ч и при отсутствии существенных искажающих факторов, как, например, газопроявления, выражен достаточно четко.

Существенно то, что состояние пород в приствольной зоне почти не влияет на уклон основного прямолинейного участка линии зависимости (4.39) или (4.40). Это является большим достоинством рассматриваемого простого метода, позволяющего получать в большинстве случаев достаточно надежные значения коэффициента фильтрации или проницаемости для скважин с на-

рушенными или закольматированными породами в приствольной зоне, неудовлетворительной конструкцией или засоренностью фильтра и т. п.

В конце периода восстановления уровня (или давления на устье) также не наблюдается линейной зависимости между Δh_c и $\lg t$. Это объясняется тем, что приближенная формула (4.40) при больших значениях t становится неверной; действительно, согласно этой формуле при $t \rightarrow \infty \Delta h_c$ также неограниченно возрастает, что невозможно.

График зависимости (4.37) в полулогарифмическом масштабе имеет в начальный период откачки, проводимой при постоянном дебите, также четко выраженный прямолинейный участок, позволяющий определить фильтрационные параметры, как и по данным наблюдений после остановки скважин. Но наблюдения над уровнем в данном случае менее удобны и могут искажаться при неравномерной работе насоса.

Для условий кратковременной откачки, заканчиваемой при явно неустановившемся режиме, может быть также применено для определения фильтрационных параметров по данным восстановления уровня или давления построение графика зависимости (4.39) в координатах $S_{c.0}$ и $\lg [t/(t - t_0)]$. Прямолинейный отрезок графика в данном случае иногда выражен даже более четко, чем при продолжительной откачке, уклон его рассчитывается по формуле

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{S_{01} - S_{02}}{\lg \frac{t_1}{t_1 - t_0} - \lg \frac{t_2}{t_2 - t_0}}, \quad (4.43)$$

где S_{01} и S_{02} — значения понижения уровня при времени t_1 и t_2 от момента остановки скважины (индекс «с» для упрощения опущен; рис. 4.5).

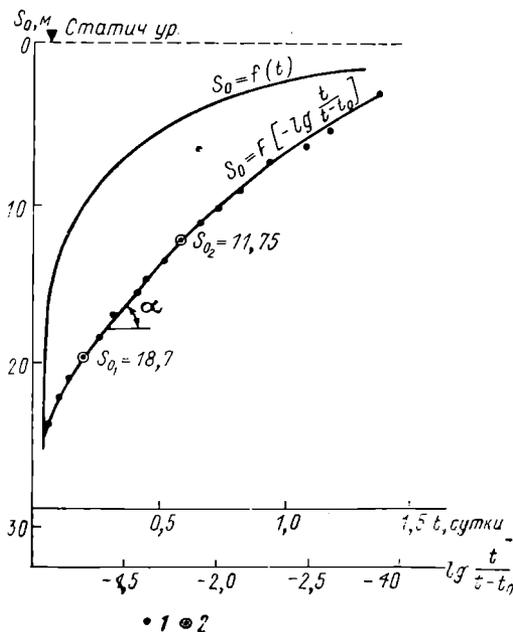


Рис. 4.5

График восстановления уровня после кратковременной откачки (скважина в районе г. Калуща Ивано-Франковской области; интервал опробования 1372—1280 м в песчаниках верхнего мела).

$Q = 340 \text{ м}^3/\text{сутки}$; $t_0 = 10\,400$, $t_1 = 10509$, $t_2 = 11\,210$ мин; $S_c = 90$, $S_{01} = 18,7$, $S_{02} = 11,75$ м; $i = 11$ м; $M = 92$ м; $kM = 5,5 \text{ м}^2/\text{сутки}$; $k = 0,06 \text{ м}^2/\text{сутки}$.

Точки: 1 — замеров уровня; 2 — расчетные (концы прямолинейного отрезка линии).

Описанные методы, очевидно, применимы и к закачкам, если после остановки скважины ведутся наблюдения за понижением давления на устье, а затем при статическом уровне, находящемся ниже устья, за понижением уровня в скважине.

Наконец, следует указать, что зависимость (4.37) по существу представляет собой формулу Дюпюи, в которой $R = 1,5\sqrt{h_0}$, т. е. радиус влияния зависит от времени. Такой способ определения радиуса влияния является во многих случаях наиболее правильным.

В статье автора [68] даются подробные указания относительно применения для определения коэффициента фильтрации формулы Дюпюи с неустановившимся радиусом влияния, рассчитанным указанным способом, в частности отмечается возможность значительно сократить при этом продолжительность откачки.

Американским инженером Томасом предложен метод определения безразмерной величины ε , называемой им фактором повреждения пласта [158] и связанной простой зависимостью с приведенным радиусом водоприемной части скважины, о чем упоминалось выше.

Метод основан на сопоставлении значений коэффициента проницаемости или фильтрации, рассчитанных по формуле Дюпюи и по графику восстановления уровня или давления после остановки скважины, что дает для определения ε следующую возможность:

$$\varepsilon = 1 - \alpha = 1 - \frac{2i (\lg R - \lg r_c)}{S_c} \quad (4.44)$$

где α — коэффициент несовершенства, представляющий собой отношение дебитов несовершенной и совершенной скважин; i — уклон прямолинейного участка графика восстановления уровня (давления).

Величина ε характеризует относительное снижение дебита или увеличение понижения уровня вследствие несовершенства скважины и дополнительных входных сопротивлений. Зависимость $r_{c, \text{пр}}$ от ε выражается формулой

$$\lg R - \lg r_{c, \text{пр}} = \frac{1}{\varepsilon - 1} (\lg R - \lg r_c) \quad (4.45)$$

Величина ε может быть отрицательной, если в пристволенной зоне проницаемость пород увеличилась из-за суффозии, размыва или искусственных мероприятий, как, например, кислотная обработка. Метод Томаса дал хорошие результаты при обработке автором данных исследования многочисленных глубоких скважин на промышленные воды в Краснодарском крае.

Методы расчета фильтрационных параметров при мгновенной остановке скважины (наличие в начале периода восстановления уровня или давления постепенно уменьшающегося дебита) рассмотрены во многих работах. Ниже описываются только два

Производные, входящие в формулу (4.48), вычисляются по приближенным зависимостям, основанным на замене производных отношениями конечных разностей.

Обработка переменных величин $q(t)$ и $p_c(t)$ (переменного давления на уровне пласта) заключается в интегральном преобразовании Лапласа с действительным параметром $1/\tau$, т. е. в вычислении значений $\bar{p}(t)$ и $\bar{Q}(t)$ по следующим формулам:

$$\bar{p}(t) = \int_0^{\infty} [p_c(t) - p_c(0)] e^{-\frac{t}{\tau}} dt; \quad (4.49)$$

$$\bar{Q}(t) = \int_0^{\infty} [Q(0) - q(t)] e^{-\frac{t}{\tau}} dt, \quad (4.50)$$

где τ — переменный параметр; $p_c(0)$ и $Q(0)$ — забойное давление и дебит скважины в момент остановки или пуска, в последнем случае $Q(0) = 0$.

Для определения фильтрационных параметров k_n и χ рассчитывается величина $\psi(\tau) = \bar{p}(\tau)/\bar{Q}(\tau)$ и используется приближенная зависимость, очень мало отклоняющаяся от точной формулы, начиная с весьма малых значений

$$\psi(\tau) = \frac{0,183\eta}{k_n M} \left(\lg \tau - 2 \lg \frac{r_c}{\sqrt{\chi}} - 0,101 \right)^*. \quad (4.51)$$

Построение графика этой зависимости в координатах ψ и $\lg \tau$ дает прямую линию, позволяющую рассчитать величины $\eta/(k_n M)$ и $r_c \sqrt{\chi}$ аналогично рассмотренной выше зависимости (4.40) и при известных значениях η , M и r_c найти параметры k_n и χ .

В книге А. Бана, А. Ф. Богомолова и других [31] приведен вывод зависимости (4.51) и даны подробные указания по методике численного интегрирования выражений (4.49) и (4.50). Следует отметить, что в настоящее время довольно трудоемкий процесс численного интегрирования может быть точно и в короткий срок произведен на ЭВМ.

§ 4.6. Обоснование зависимостей для наблюдательных и групп взаимодействующих скважин

Основная формула упругого режима (4.36) при наличии одной наблюдательной скважины дает возможность рассчитать параметры k и χ более точно, чем по данным исследования только опытной скважины по формуле

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_i \left(-\frac{r_1^2}{4\chi t_1} \right)}{E_i \left(-\frac{r_1^2}{4\chi t_2} \right)}, \quad (4.52)$$

* Зависимость преобразована в более удобный для расчетов вид, некоторые обозначения изменены.

где r_1 — расстояние до наблюдательной скважины от опытной; S_1 и S_2 — соответственно понижения уровня в наблюдательной скважине по истечении времени t_1 и t_2 от момента пуска опытной скважины.

Формула (4.52) применима и для периода восстановления уровня после остановки опытной скважины, работающей при практически установившемся режиме, если в ней заменить отношение понижений S_1/S_2 отношением повышений уровня $\Delta h_1/\Delta h_2$.

Для получения достаточно точных значений определяемых параметров величина указанных отношений должна быть не менее двух. Большая точность рассматриваемой формулы обусловлена тем, что в нее не входит величина r_c , а также исключается влияние искажающих факторов, вызванных различными процессами в опытной скважине: образованием газо-водяной эмульсии, изменением температуры воды и т. п.

Параметры по формуле (4.52) рассчитывают так: первоначально методом подстановки определяют величину χ , удовлетворяющую значению отношения S_1/S_2 ; затем полученное значение χ подставляют в зависимость (4.36) для S_1 и t_1 и находят k . Желательно также для контроля определить k на той же зависимости для S_2 и t_2 .

Для определения параметров по формуле (4.52) можно применить эталонную кривую Ю. П. Борисова [158].

Если опытная скважина работала до остановки непродолжительное время, почему режим движения подземных вод был еще далек от установившегося, параметры рассчитываются по формуле, представляющей собой следствие зависимости (4.38) [62]:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_i\left(-\frac{r^2}{4\chi t_1}\right) - E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi(t_1-t_0)}\right]}{E_i\left(-\frac{r^2}{4\chi t_2}\right) - E_i\left[-\frac{r^2}{4\chi(t_2-t_0)}\right]}, \quad (4.53)$$

где t_0 — продолжительность откачки; S_1 и S_2 — понижения уровня после остановки скважины (остаточные понижения) соответственно для времени t_1 и t_2 от начала откачки.

Параметры по формуле (4.53) рассчитываются так же, как по формуле (4.52).

При наличии двух наблюдательных скважин, отстоящих от центральной на расстоянии r_1 и r_2 , расчет фильтрационных параметров производится по формуле

$$\frac{S'_1}{S'_2} = \frac{E_i\left(-\frac{r_1^2}{4\chi t}\right)}{E_i\left(-\frac{r_2^2}{4\chi t}\right)}, \quad (4.54)$$

где S'_1 и S'_2 — понижения уровня соответственно в первой и второй наблюдательных скважинах.

Расчет параметров по формуле (4.54) выполняется так же, как по формуле (4.52), причем она применима как для начального периода откачки (или закачки), так и времени восстановления уровня (давления) после остановки скважины.

Принцип суперпозиции дает возможность получить на основании формулы (4.36) зависимости для определения фильтрационных параметров по данным перехода на другой режим откачки или закачки, т. е. при резком увеличении или уменьшении дебита (при каждом режиме неизменного во времени). В случае увеличения дебита от Q_1 до Q_2 в расчетную формулу вводится слагаемое, соответствующее дополнительной скважине с дебитом $Q_2 - Q_1$, начинающей работать в момент изменения режима. При уменьшении дебита от Q_1 до Q_2 вводится слагаемое, соответствующее фиктивной нагнетательной скважине с дебитом $Q_1 - Q_2$. Зависимости, полученные указанным путем, и примеры расчетов рассмотрены в книге В. С. Чернова и других [158].

Коэффициент пьезопроводности может быть рассчитан также по простой формуле

$$\chi = \frac{r^2}{4t}, \quad (4.55)$$

где r — расстояние до наблюдательной скважины от центральной; t — время от момента пуска или остановки центральной скважины, соответствующее точке перегиба на графике зависимости от времени уровня (давления) в наблюдательной скважине.

Этот простой способ нахождения χ , однако, дает менее точные результаты, чем предыдущие, вследствие обычной нечеткости точки перегиба и поэтому невозможности достаточно определенно установить время t .

Если в формуле (4.51) заменить r_c расстоянием до наблюдательной скважины r , то она может служить для расчетов параметров по данным измерения уровня или давления в этой скважине. Однако необходимая точность результатов получается только при $r/\sqrt{\chi t} = 0,01$. Если это условие не выполняется, то следует пользоваться более сложной формулой, в которой указанная величина представляет собой аргумент функций Бесселя [31].

Н. Н. Веригиным [29] составлен ряд таблиц и графиков, значительно упрощающих расчеты параметров для условий неустановившегося движения подземных вод, так как отпадает необходимость применения способа подстановки. По данным Н. Н. Веригина, можно производить расчеты как для одиночных скважин, так и для опытных кустов с совершенной и несовершенной центральной скважиной. Эти данные получены путем интегрирования уравнения пьезопроводности для линейных стоков; краткие сведения о соответствующих методах имеются в книге Ф. М. Бочера и других [115].

Зависимости для определения фильтрационных параметров по данным работы групп взаимодействующих скважин при

неустановившемся движении подземных вод, так же как рассмотренные выше зависимости для установившегося движения, основаны на принципе суперпозиции, которому удовлетворяет основная формула упругого режима (4.36) при неизменном во времени дебите скважин.

Для напорных вод и при неограниченном распространении и постоянстве исследуемого горизонта понижение уровня в любой точке S , вызванное действием группы взаимодействующих скважин, подчинено общей зависимости

$$S = - \frac{1}{4\pi kM} \sum_{i=1}^n Q_i E_i \left(- \frac{r_i^2}{4\chi t_i} \right), \quad (4.56)$$

где n — число скважин группы; Q_i , r_i и t_i — соответственно дебит скважины, расстояние ее от расчетной точки и время пуска, отсчитываемое от момента пуска скважины, начинающей работать раньше всех.

Для расчета фильтрационных параметров по приведенной зависимости могут служить данные начального периода работы скважин и периодов, следующих за остановкой одной или нескольких скважин, а также за прекращением работы всей группы. Целесообразно использование также данных для периодов, соответствующих переходу отдельных скважин на другой режим работы, и при известном усложнении расчетов — данных всего или значительной части общего времени действия группы.

В моменты остановки скважин или перехода их на другой режим в сумму формулы (4.56) вводятся слагаемые, соответствующие пуску фиктивных нагнетательных скважин, имеющие противоположный знак. Дебит фиктивной скважины тот же, что и у остановленной, а при переходе на другой режим равен разности нового и первоначального дебита. Таким образом, сумма в формуле (4.56) алгебраическая.

Расчетной точкой, где фиксируется понижение S , может быть местоположение наблюдательной или остановленной скважины, а также точка на водоприемной поверхности любой работающей скважины.

Для определения неизвестных величин χ и kM следует подставить в уравнение (4.56) два значения S и значения соответствующих им промежутков времени и решить полученные два уравнения, которые делятся друг на друга, чем исключается общий множитель $1/(4\pi kM)$. Это дает возможность определить методом подстановки коэффициент пьезопроводности. При значениях аргумента функции E_i , меньших примерно 0,5, возможна замена ее приближенным выражением через логарифм, вследствие чего нахождение χ значительно упрощается.

Для нахождения коэффициента фильтрации полученное значение χ подставляется в уравнение (4.56) для обоих значений S ,

что дает два значения водопроницаемости kM , которые при правильном выполнении расчетов должны быть одинаковыми.

Получение достаточно точных результатов обеспечивается, если отношение большей величины S к меньшей не менее двух.

Отдельные варианты формулы (4.56) были применены автором для расчета параметров на ряде месторождений промышленных вод и дали удовлетворительные результаты. Наиболее точные данные получаются для зависимостей, не содержащих величины $t_{сн}$ в которых расчетными точками служат только наблюдательные скважины.

Объем данной книги позволяет рассмотреть только схему расчета параметров для всего периода работы группы скважин, дающего надежные результаты при достаточной полноте и точности фактического материала.

Для группы эксплуатационных скважин на три глубины горизонта подземных вод в районе г. Краснокамска Пермской области эта схема заключалась в следующем (материалы автора и Всесоюзного научно-исследовательского института галургии):

- 1) для каждой эксплуатационной скважины период ее работы был разбит на интервалы продолжительностью 30—150 суток с более или менее постоянным режимом (период работы отдельных скважин достигал 18 лет, число скважин для отдельных горизонтов было от 4 до 10);

- 2) для каждого интервала времени было рассчитано среднее взвешенное значение дебита скважины с учетом перерывов ее работы;

- 3) по данным для отдельных интервалов было рассчитано общее количество воды, откачанное из каждой скважины за весь период ее работы, и средний дебит за это время, включая перерывы работы;

- 4) для понижения уровня в эксплуатационных скважинах, принятых в качестве расчетных, а также и в наблюдательных, которыми служили скважины, еще не введенные в эксплуатацию или остановленные, были составлены соответствующие варианты формулы (4.56);

- 5) определение коэффициента проницаемости путем решения полученных уравнений методом подстановки (принципиально возможное) не производилось вследствие большой трудоемкости. Поэтому в полученные выражения при фактических значениях S и t подставлялись наиболее вероятные значения χ , найденные по другим зависимостям; величина kM определялась путем решения простых уравнений первой степени (подставлялось два значения χ , одно вдвое больше другого, причем разница их величин очень слабо влияла на результаты расчетов). Полученные значения водопроницаемости kM хорошо согласовались с определенными другими методами и были приняты как основа для оценки эксплуатационных запасов промышленных вод.

Составление зависимостей, основанных на приложении принципа суперпозиции к основной формуле упругого режима, облегчается при соблюдении следующих указаний:

1) суммирование понижения уровня (давления), вызванного отдельными скважинами, производится алгебраически: слагаемые, соответствующие откачке и закачке (для реальных или фиктивных нагнетательных скважин), имеют разные знаки;

2) время t , при котором фиксируется понижение уровня в расчетной точке, целесообразно отсчитывать от начала работы группы, т. е. от момента пуска первых (по времени) скважин;

3) все скважины, как существующие, так и фиктивные, считаются работающими от момента их пуска до конца расчетного периода.

§ 4.7. Зона влияния скважины. Радиус депрессионной воронки

В предыдущем изложении неоднократно упоминалась величина радиуса депрессионной воронки (радиуса влияния) и были приведены некоторые соображения и зависимости, касающиеся его определения.

Задачей настоящего параграфа является уточнение этого довольно неопределенного понятия и краткое указание наиболее надежных методов расчета радиуса депрессионной воронки.

Радиус депрессионной воронки не является фильтрационным параметром, так как его величина зависит от ряда факторов, не связанных с особенностями горных пород, как, например, интенсивность и продолжительность откачки или закачки.

Влияние откачки или закачки постепенно распространяется до границ изучаемого горизонта (но может быть на значительном расстоянии от скважины очень слабым). Поэтому представление об ограниченной зоне влияния на площади распространения изучаемого горизонта неправильно, хотя условия, очень близкие к подобным, могут наблюдаться (см. ниже). Кроме того, в реальных условиях депрессионная воронка обычно асимметрична и не имеет резких границ.

Размеры депрессионной воронки в начальный период откачки быстро возрастает, затем ее рост замедляется и может прекратиться, если отбор воды пополняется за счет питания водоносного горизонта.

Радиус влияния, увеличивающийся во времени, называется неустановившимся, а практически неизменный — установившимся.

Границы водоносного горизонта с различными водоемами и сильно водообильными водоносными горизонтами, питающими его при откачке, а также (для напорных водоносных горизонтов) с областью питания подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков представляют собой контур питания водоносного горизонта, усредненное расстояние до которого от скважины

Основные формулы для определения радиуса депрессионной воронки *

Номер формулы	Формула	Автор	Условия применения и обозначения
1. Установившийся радиус влияния			
(4.57)	$\lg R = \frac{S_1 \lg r_2 - S_1 \lg r_1}{S_1 - S_2}$	Ж. Дююи [69]	По данным кустовых откачек для напорных вод
(4.58)	$\lg R = \frac{S_1(2H - S_1) \lg r_2 - S_2(2H - S_2) \lg r_1}{(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}$	То же	То же, для безнапорных вод; S_1 и r_1 — пониженные уровни и расстояние от центральной до первой наблюдательной скважины; S_2 и r_2 — то же, для второй
(4.59)	$R = 2a_p$	Ф. Форхгеймер [69, 151]	Для скважин, находящихся вблизи реки или другого водоема при прямолинейном очертании берега; a_p — расстояние скважины до берега реки
(4.60)	$R = 0,34 \sqrt{\frac{Q}{w}}$	Е. Е. Керкис [69, 144]	При питании водоносного горизонта за счет инфильтрации; w — инфильтрация
(4.61)	$R = \frac{1,12}{\sqrt{\xi}}$	Н. К. Гиринский, А. Н. Мятлев [43, 105]	При питании водоносного горизонта за счет перетока из смежных горизонтов с высокой водообильностью; ξ — коэффициент связи (параметр перетекания)

(4.63)

$$\lg R - \lg r_c = \frac{S_c}{2i}$$

Е. Е. Керкис
[59, 144]

По данным восстановления уровня панорного горизонта после остановки скважины; i — уклон прямолинейного участка графика восстановления уровня с логарифмическим масштабом времени

3. Приближенные формулы для откачек из одиночных скважин

(4.64)

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{\varphi H}}$$

Н. М. Победоносцев [86]

Для безнапорных горизонтов; φ — коэффициент водоотдачи

(4.65)

$$\frac{1}{R} \approx \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

Е. Е. Керкис
[69, 144]

Болеe чем при одном виде питания подоносного горизонта; R_1 — радиус влияния при одном виде питания; R_2 — то же, при другом виде и т. д.

* Грубоориентировочные значения R для кратковременных откачек из безнапорных водоносных горизонтов в рыхлых породах при понижении уровня на несколько метров приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Ориентировочные величины расчетного радиуса депрессионной воронки для рыхлых пород, по Д. И. Щеголеву

Песок	Преобладающие размеры частиц, мм	R , м	Гравий	Преобладающие размеры частиц, мм	R , м
Тонкозернистый	0,05—0,1	25—50	Мелкий	2,0—3,0	500—600
Мелкозернистый	0,1—0,25	50—100	Средний	3,0—5,0	600—1500
Среднезернистый	0,25—0,5	100—200	Крупный	5,0—10,0	1500—3000
Крупнозернистый	0,5—1,0	200—400			
Грубозернистый	1,0—2,0	400—500			

характеризуется радиусом контура питания. Последний соответствует наиболее простой схеме — границе областей питания в виде окружности, в центре которой находится скважина. Такая схема заменяет более сложное очертание рассматриваемых границ, наблюдаемое в действительности, и строго отвечает формуле Дюпюи.

Примерно таким же, но несколько более широким является понятие о приведенном радиусе депрессионной воронки (приведенном радиусе влияния), соответствующем той же схеме (скважина в центре кругового контура), но заменяющем еще более сложные природные условия: отсутствие четких границ области питания водоносного горизонта, питание безнапорного горизонта за счет инфильтрации на всей площади депрессионной воронки, а также питание за счет перетока из других горизонтов.

Контур питания водоносного горизонта считается его границей с практически постоянным напором.

Радиус контура питания и приведенный радиус депрессионной воронки рассматриваются как установившиеся, хотя величина последнего может иногда колебаться в довольно широких пределах в зависимости от интенсивности инфильтрации.

Для практических расчетов исходной величиной часто является так называемый расчетный радиус депрессионной воронки, определяемый по приближенным формулам (иногда дающим только порядок его величины), принимаемый по аналогии или взятый из таблиц. Иногда применяется условный радиус влияния, представляющий собой среднее расстояние от скважины, соответствующее определенному понижению напора (уровня), например 1—2% от понижения в скважине.

В табл. 4.2 приведены основные зависимости для определения радиуса депрессионной воронки R при откачках из скважин. В табл. 4.3 указана ориентировочная величина R для откачек из неглубоких скважин в рыхлых породах.

Г Л А В А 5

ОБОСНОВАНИЕ ГЛАВНЕЙШИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ ПОРОД

СЛОИСТЫЕ ТОЛЩИ

Слоистые толщи, широко распространенные среди осадочных пород, характеризуются фильтрационной анизотропией, количественно выражаемой величиной A , называемой коэффициентом анизотропии, или величиной λ , причем

$$A = k_c/k_n; \quad \lambda^2 = 1/A, \quad (5.1)$$

где k_c — коэффициент фильтрации в направлении, параллельном слоистости, представляющий собой среднее взвешенное из коэффициентов фильтрации отдельных слоев; k_n — коэффициент фильтрации в направлении, нормальном к слоистости.

Величина k_n определяется известной формулой Г. Н. Каменского [56]

$$k_n = M / \sum (k_i / M_i), \quad (5.2)$$

где M — общая мощность толщ; k_i и M_i — коэффициент фильтрации и мощность каждого слоя.

Проницаемость слоистых толщ в различных направлениях характеризуется эллипсоидом вращения с главными осями, пропорциональными k_c и k_n и направленными вдоль слоистости и перпендикулярно к ней.

У однородных слоистых толщ эллипсоид проницаемости неизменен в пространстве.

Неоднородность слоистых толщ может выражаться изменением значений k_c и k_n или в направлении слоистости или в нормальном к ней направлении, а нередко и тем и другим; следовательно, могут меняться в этих направлениях как соотношение главных осей, так и их размеры.

Величина коэффициента анизотропии для различных слоистых толщ меняется в очень широких пределах: от 3—4 при слабо выраженной анизотропии, которой обычно можно пренебречь (для изотропных пород $A = 1$), до очень больших величин, свойственных породам, практически непроницаемым в направлении, нормальном к слоям.

Для фильтрационных расчетов, проводимых для анизотропных пород, часто пользуются эффективным коэффициентом фильтрации, по Ф. Шаффернаку [56], равным

$$k_{эф} = \sqrt{k_c k_n}. \quad (5.3)$$

Для однородных слоистых пород при фильтрации в плоскости, нормальной к поверхности напластования, основное дифференциальное уравнение следующее [6]:

$$k_c \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_n \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0, \quad (5.4)$$

где h — напор; x и y — координаты (ось ox направлена параллельно напластованию, ось oy — по нормали к нему).

Уравнение (5.4) преобразуется в уравнение Лапласа путем введения новой независимой переменной

$$\xi = x/A. \quad (5.5)$$

Такое преобразование равносильно сокращению области фильтрации в направлении оси ox в A раз.

§ 5.1. Изучение фильтрационных свойств слоистых толщ

Наиболее существенными характеристиками слоистых толщ являются их фильтрационная анизотропия и степень и характер фильтрационной неоднородности. Связь этих характеристик с литологией, фациальной изменчивостью и трещиноватостью была рассмотрена в первой части книги (см. гл. 2); там же были приведены основные сведения о значении лабораторных определений и методике отбора представительных образцов при изучении фильтрационных свойств слоистых толщ.

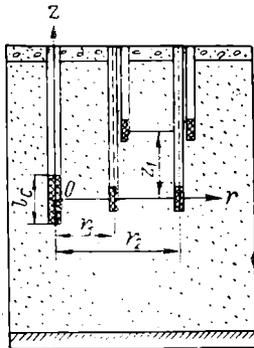


Рис. 5.1

Схема расположения фильтров при определении параметров фильтрационной анизотропии для однородной анизотропной толщи большой мощности, по В. Д. Бабушкину [8].

Ниже приводятся основные данные, касающиеся других методов изучения рассматриваемых толщ.

1. Определение коэффициентов фильтрации в вертикальном и горизонтальном направлениях и коэффициента анизотропии посредством опытных кустовых откачек для однородных горизонтально залегающих слоистых толщ предложено В. Д. Бабушкиным и С. П. Раевским [9]. Схема проведения опытных работ и расчетов параметров основана на интегрировании дифференциального уравнения (5.4) по методу линейных стоков.

Рекомендуемая схема соответствует значительной мощности исследуемого горизонта и заключается в проведении кустовой откачки при четырех наблюдательных скважинах на каждом луче, положение фильтров которых должно быть следующим (рис. 5.1):

1) фильтр центральной скважины располагается в средней части изучаемого горизонта и по длине не должен превышать $1/4$ — $1/3$ его мощности;

2) фильтры наблюдательных скважин располагаются на двух уровнях: середины одного ряда фильтров находятся на одной высоте с серединой фильтра центральной скважины, фильтры второго ряда выше или ниже фильтра центральной скважины;

3) концы фильтров наблюдательных скважин должны отстоять от водоупорного ложа и кровли горизонта (при безнапорном горизонте от свободной водной поверхности) не менее чем на расстояние, равное длине фильтра центральной скважины;

4) расстояние наиболее удаленной наблюдательной скважины от центральной должно быть не больше $1/3$ — $1/2$ мощности водоносного горизонта.

Расчет коэффициентов фильтрации производится по формулам В. Д. Бабушкина:

$$\frac{S'_i}{S_i} = \frac{\operatorname{arsh} \frac{0,5l_c + z_1}{\lambda r_i} - \operatorname{arsh} \frac{z_1 - 0,5l_c}{\lambda r_i}}{2 \operatorname{arsh} \frac{0,5l_c}{\lambda r_i}}; \quad (5.6)$$

$$k_c = \frac{Q}{4\pi l_c (S'_i - S_i)} \left(2 \operatorname{arsh} \frac{0,5l_c}{\lambda r_i} + \operatorname{arch} \frac{z_1 - 0,5l_c}{\lambda r_i} - \operatorname{arsh} \frac{z_1 + 0,5l_c}{\lambda r_i} \right), \quad (5.7)$$

где S_i и S'_i — соответственно понижение уровня в наблюдательной скважине с фильтром, расположенным на одном уровне с фильтром центральной скважины, и в скважине, расположенной выше или ниже; r_i — расстояние до данной пары наблюдательных скважин от центральной; z_1 — высота середины фильтра наблюдательной скважины по отношению к горизонтальной плоскости, проходящей через середину фильтра центральной скважины; l_c — длина фильтра центральной скважины; $\lambda = \sqrt{k_b/k_r}$ — определяется по формуле (5.6) методом подстановки; k_r — коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, т. е. в данном случае вдоль слоев; k_b — то же, в вертикальном направлении, т. е. перпендикулярном к напластованию; k_b определяется по формуле, одинаковой с выражением (5.1):

$$k_b = k_r \lambda^2 = k_r / A.$$

При примыкании фильтров центральной и первого ряда наблюдательных скважин к верхнему или нижнему водоупорному слою напорного горизонта выражения (5.6) и (5.7) видоизменяются так: в аргументах функций arsh величина $0,5 l_c$ заменяется l_c , а z_1 становится равным нулю; у наблюдательных скважин другого ряда, не примыкающих к водоупору, z_1 должно быть равным расстоянию до середины фильтра их по вертикали от горизонтальной плоскости, проходящей через середину фильтра центральной скважины.

Приведенные формулы теоретически вполне обоснованы, но в реальных условиях нередко не дают удовлетворительных результатов из-за недостаточной однородности изучаемого горизонта.

2. Ориентировочная оценка фильтрационной анизотропии путем сопоставления данных суммарных нагнетаний или наливов с данными поинтервальных опытов применима также для устойчивых слоистых пород [см. формулу (4.19)].

3. При изучении фильтрационных свойств слоистых пород большое значение имеют данные расходографии. Этот метод заключается в измерении на различных глубинах средней скорости движения воды, поступающей из отдельных водоносных слоев при откачке или поглощаемой ими при наливе. Скорость

измеряется специальными гидрометрическими вертушками или геофизическими методами, лучше всего непрерывно (см. § 7.3).

График зависимости скорости движения воды от глубины дает возможность просто рассчитать расход воды, поступающей в скважину из отдельных прослоев (или поглощающейся в них при наливе) по формуле

$$q = \pi r^2 \Delta v, \quad (5.8)$$

где r — радиус скважины на глубине залегания исследуемого прослоя; Δv — приращение скорости, соответствующее приток или отток воды для этого прослоя.

Эюра расходов, полученная по данным расходомерии (см. рис. 10.1), дает ясное представление о степени однородности толщи в направлении, параллельном скважине. Для горизонтально залегающих слоистых пород расходы воды, соответствующие отдельным прослоям, позволяют рассчитать их водопроницаемость и приблизительно оценить средний коэффициент фильтрации в вертикальном направлении по формуле (5.2). При наличии среднего горизонтального коэффициента фильтрации, рассчитанного по формуле среднего взвешенного или полученного обычным способом по данным откачки или налива, можно также приблизительно рассчитать коэффициент анизотропии.

ПОРОДЫ, НЕОДНОРОДНЫЕ В ПЛАН

§ 5.2. Влияние плановой неоднородности на дебит скважин и распределение напоров при откачке

При откачке из пород, неоднородных в плане, распределение напоров вокруг скважины изменяется, и формулы для расчета водопритока к скважине, служащие для расчета проницаемости и других параметров по данным опытов для однородных пород становятся неточными.

Получение точных зависимостей в данном случае почти всегда возможно только путем применения метода ЭГДА, а для типовых схем-расчетов — при помощи ЭВМ.

Частные случаи, для которых возможны аналитические решения, рассмотрены ниже.

1. Понижение уровня S_c при откачке из скважины, окруженной кольцевой зоной повышенной или пониженной проницаемости определяется зависимостью

$$S_c = \frac{Q}{2\pi M} \left[\int_{r_c}^{r_1} \frac{dr}{rk(r)} + \frac{1}{k} \ln \frac{R}{r_1} \right], \quad (5.9)$$

где r_c — радиус водоприемной части скважины; r_1 — радиус кольцевой зоны; $k(r)$ — коэффициент фильтрации в кольцевой

зоне, являющийся функцией радиуса-вектора; k — коэффициент фильтрации во внешней зоне.

Первое слагаемое в квадратных скобках формулы (5.9) соответствует понижению напора в кольцевой зоне, второе — понижению во внешней зоне, где действительна формула Дюпюи.

Образование зоны с повышенной проницаемостью может быть следствием нарушения пород при бурении скважины или суффозии, а также специальных мероприятий: кислотной обработки, гидроразрыва и т. п.; понижение проницаемости происходит вследствие колматации пород глинистым раствором или буровым шламом.

При линейной зависимости $k(r)$ понижение уровня во внутренней зоне

$$S_1 = \frac{Q}{2\pi M A} \ln \frac{r_1(A + Br_c)}{r(A + Br_1)}, \quad (5.10)$$

где $A = \frac{k_c r_1 - k r_c}{r_1 - r_c}$; $B = \frac{k - k_c}{r_1 - r_c}$; k_c — коэффициент фильтрации пород на водоприемной поверхности скважины.

Если еще больше схематизировать условия для внутренней зоны, полагая, что в ней коэффициент фильтрации постоянен и равен k_b , то понижение уровня в обеих зонах выражается формулой Дюпюи, а общее понижение [171]

$$S_c = \frac{Q}{2\pi M} \left(\frac{1}{k_b} \ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{1}{k} \ln \frac{R}{r_1} \right). \quad (5.11)$$

Расчеты по формулам (5.10) и (5.11) показывают, что изменение проницаемости пород в приствольной зоне даже при небольшом радиусе ее сильно влияет на результаты определения коэффициента фильтрации по данным исследования одиночных скважин.

2. В книге П. Я. Полубариновой-Кочиной [123] рассматривается водоносный горизонт, состоящий из двух частей с разными коэффициентами фильтрации, разделенных прямолинейной границей, и даются зависимости для расчета дебита при откачке и определения коэффициентов фильтрации каждой части.

3. Уравнение неразрывности при коэффициенте фильтрации, являющемся функцией координат x и y следующее [123]:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{\partial k}{\partial x} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0. \quad (5.12)$$

Решение этого уравнения возможно при следующей зависимости коэффициента фильтрации только от x (решение получено автором):

$$k = k_0 e^{2mx}, \quad (5.13)$$

где k_0 — коэффициент фильтрации в пункте расположения опытной скважины, принятом за начало координат; m — параметр,

определяющий закон изменения проницаемости (обычно равно $0,01-0,001 \text{ м}^{-1}$).

Подстановкой $S = Ue^{-mx}$, где S — понижение уровня в произвольной точке области депрессии с координатами x и r , U — новая переменная, являющаяся функцией только радиуса вежтора r , уравнение (5.12) преобразуется в следующее:

$$\nabla U - m^2 U = 0, \quad (5.14)$$

где ∇ — обозначение оператора Лапласа.

Для плоско-радиального потока при откачке из скважины уравнение (5.14) приобретает вид

$$\frac{d^2 U}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU}{d\rho} - U = 0, \quad (5.15)$$

где $\rho = mr$.

Общее решение этого уравнения следующее:

$$S = e^{-mx} [c_1 I_0(mr) + c_2 K_0(mr)], \quad (5.16)$$

где I_0 и K_0 — обозначение функций Бесселя от мнимого аргумента нулевого порядка; c_1 и c_2 — постоянные, определяемые из граничных условий.

Для расхода скважины получается формула

$$Q = \frac{2\pi k M m r_c K_1(mr_1)}{K_0(mr_c) - K_0(mlt)}, \quad (5.17)$$

где K_1 — обозначение функции Бесселя от мнимого аргумента первого порядка.

Расчеты по полученным формулам показывают, что при небольших изменениях коэффициента фильтрации в пределах депрессионной воронки дебит скважины лишь немного больше рассчитанного по формуле Дююи при $k = k_0$.

Расчет, произведенный при $m = 0,005$, $r_c = 0,1$ м, $R = 100$ м, разности максимального и минимального коэффициента фильтрации около 100% от k_0 (на внешней границе области депрессии), показывает, что дебит скважины получается всего на 1,1% большим, чем рассчитанный по формуле Дююи.

Понижение пьезометрического уровня вдоль оси ox несколько увеличивается по сравнению с соответствующим формуле Дююи в направлении уменьшения коэффициента фильтрации (при отрицательных значениях m) и уменьшается в противоположном направлении. Вдоль оси oy понижение уровня почти не меняется (рис. 5.2).

4. При более сложной плановой неоднородности моделирование по методу ЭГДА должно основываться на схематических картах области депрессии с выделением участков различной проницаемости пород с небольшим числом градаций. При составлении этих карт нужно учитывать, что участки с повышенной или пониженной проницаемостью пород, находящиеся вблизи скважин, значительно больше влияют на условия водопритока.

В полевых условиях приближенное представление о плановой фильтрационной неоднородности и анизотропии неглубоко залегающих водоносных пород может быть получено по данным геофизических работ — съемки изолиний потенциала фильтрационного электрического поля, возникающего при откачке или нагнетании. В однородных породах изолинии этого поля представляют собой концентрические окружности, в центре которых

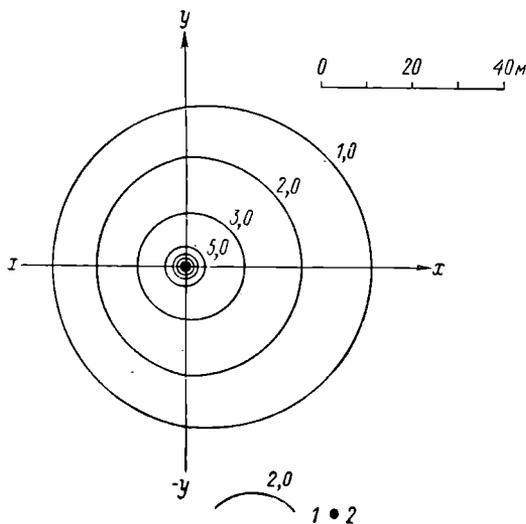


Рис. 5.2

Схема депрессионной воронки при изменении коэффициента фильтрации в плане по формуле $k = k_0 e^{-mx}$ (по расчетам автора при $m = 0,005$; $R = 100$ м; $r_c = 0,1$ м).
1 — пьезоизогипсы (указано понижение напора S в метрах при $S_c = 10$ м); 2 — опытная скважина.

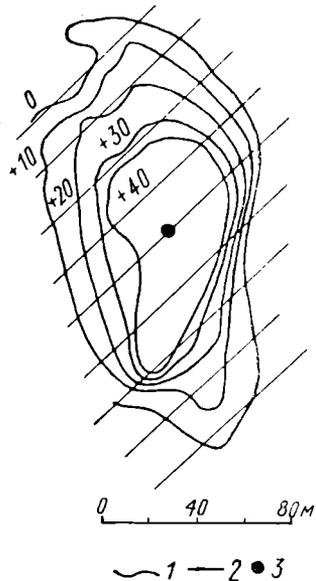


Рис. 5.3

Карта изолиний электрического потенциала фильтрационного поля при откачке, по В. С. Боркову [136].
1 — изолинии потенциала; 2 — линии профилей; 3 — скважина.

находится опытная скважина или шурф. За счет неоднородности пород изолинии потенциала приобретают сложную форму, причем сгущение их соответствует породам с более низкой проницаемостью. Вытянутая форма эквипотенциальных линий указывает на плановую анизотропию, причем большая ось эллипсоидальных фигур совпадает с направлением максимальной проницаемости.

На рис. 5.3 изображена карта изолиний фильтрационного поля, полученная при откачке со средним дебитом 270 л/сек из скважины, пробуренной в закарстованных известняках [136].

Указанный метод применим при глубине залегания водоносного горизонта, не превышающей нескольких десятков метров. Такого рода исследования, по указанию А. С. Семенова [136],

необходимо сопровождать проведением электропрофилирования и зондирования, а оценку фильтрационного поля проводить несколько раз до откачки и при различных дебитах ее.

§ 5.3. Фильтрационная неоднородность и анизотропия трещиноватых и закарстованных пород

Общая характеристика фильтрационной неоднородности и анизотропии трещиноватых и закарстованных пород была приведена в первой части книги (см. § 2.4). Неравномерное распределение и различное поперечное сечение проводящих каналов в этих породах крайне затрудняет их изучение и почти всегда исключает применение точных формул, соответствующих однородной среде, как, например, формулы В. Д. Бабушкина (5.6) и (5.7) для определения фильтрационной анизотропии.

Неудовлетворительные результаты нередко получаются также при расчетах проницаемости по данным замеров уровней в наблюдательных скважинах. При неравномерной трещиноватости иногда понижения уровня в более отдаленных наблюдательных скважинах оказываются большими, чем в близких к центральной.

Интересный пример сложной трещиноватости представляют собой данные, полученные при исследованиях (в 1939—1940 гг.) для Селижаровского месторождения бурых углей, где лихвинские доломиты (нижний карбон), образующие пласт, залегающий в среднем на глубине от 85 до 105 м, по данным нескольких кустовых откачек имели коэффициент фильтрации 8—10 м/сутки, в отдельных же скважинах при откачке с дебитом несколько литров в секунду не удалось получить заметного понижения уровня. Весьма надежно установленный по наблюдениям во время работы опытной водопонижительной установки (в 1950 г.) коэффициент фильтрации лихвинских доломитов оказался равным 55—60 м/сутки.

При обобщении всех имеющихся материалов, выполненных группой научно-исследовательского сектора Ленинградского горного института в 1939 г., было установлено, что горизонт лихвинских доломитов пересечен двумя системами трещин: первой со значительной проводимостью, но расстояниями друг от друга порядка нескольких десятков метров и второй со значительно меньшей проводимостью, но густой. Опытные кусты, у которых центральная и наблюдательные скважины пересекали только трещины второй системы, дали заниженные величины коэффициента фильтрации [116].

Количественная оценка степени неоднородности и параметров фильтрационной анизотропии трещиноватых и особенно закарстованных пород даже при тщательном проведении полного комплекса разнообразных исследований весьма затруднительна, а нередко оказывается невозможной.

И. К. Гавич [36] предложила метод изучения плановой фильтрационной анизотропии трещиноватых пород по данным кусто-

вых откачек при неустановившемся режиме. Основной рекомендуемого метода служит формула (4.36), в которой коэффициент фильтрации k заменен величиной $k_y k_x$, где k_y — максимальное, а k_x — минимальное его значения, соответствующие главным осям эллипса проницаемости. Коэффициент пьезопроводности также изменяется в плане пропорционально k .

Разработанные И. К. Гавич расчетные схемы, близкие к рассмотренным выше (см. гл. 4), позволяют определить перечисленные фильтрационные параметры по данным измерения уровня воды в наблюдательных скважинах, расположенных не менее чем на трех лучах опытного куста в количестве минимум по две на двух лучах и одной на третьем.

Рекомендуемый метод был прсверен на сеточном электроинтеграторе ИГЛ-2-10-2 в лаборатории динамики подземных вод Московского геологоразведочного института, а также в полевых условиях. Метод представляется перспективным для неглубоко залегающих водоносных горизонтов; желательна более широкая его проверка для различных геологических условий.

Г Л А В А 6

ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ПАРАМЕТРОВ КВАДРАТИЧНОГО ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ

ОБОСНОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 6.1. Определение скорости посредством индикаторов

Определение действительной скорости движения подземных вод представляет собой метод, применявшийся еще в прошлом столетии, но первоначально только для естественных потоков подземных вод.

Понятие коэффициента действительной скорости было кратко рассмотрено выше (см. § 3.4). В дополнение к изложенному ниже приводятся следующие сведения.

1. Распределение скоростей движения воды в поперечном сечении потока движущейся подземной воды всегда неравномерно, особенно у трещиноватых и закарстованных пород. Даже в пределах одного и того же проводящего канала, как известно, максимальная скорость наблюдается в его центральной части и убывает до нуля на поверхности стенок.

2. У горных пород, имеющих проводящие каналы различного поперечного сечения и ориентировки (трещиноватых и закарстованных), распределение скоростей еще значительно более неравномерно.

3. Граница между раствором индикатора, введенного в поток подземных вод, и чистой водой постепенно становится нереальной размытой вследствие неравномерного распределения скоростей а также влияния конвективной (фильтрационной) диффузии. Последняя значительно более интенсивна, чем молекулярная.

Коэффициент конвективной диффузии D_k определяется зависимо, установленной экспериментально [31]:

$$D_k = D_m + \lambda u_d \approx \lambda u_d, \quad (6.1)$$

где D_m — коэффициент молекулярной диффузии; λ — «параметр рассеяния», обычно близкий к $0,001 \text{ м}^{-1}$; u_d — средняя действительная скорость движения подземных вод. Обычно D_k примерно в тысячу раз больше, чем D_m .

4. Концентрация раствора индикатора в пункте улавливания (см. ниже) всегда меньше первоначальной вследствие указанных причин, а во многих случаях также из-за сорбции на стенках проводящих каналов. Для растворов соли, кроме того, может иметь значение движение книзу вследствие повышенной плотности.

В настоящее время определение действительной скорости движения подземных вод производится преимущественно при нагнетаниях или откачках для потоков, близких к радиальным.

Изменение концентрации индикатора в однородном линейном потоке (близком к естественным потокам грунтовых вод) изучено теоретически и проверено экспериментально [31], в результате чего возникло представление о конвективной диффузии и была получена зависимость (6.1), а также примерно установлено необходимое количество индикаторов.

Определение действительной скорости в процессе нагнетания или откачек впервые в СССР было применено автором совместно с М. И. Захарьевым в 1931 г. при исследованиях для высотной плотины на р. Сулак [60]. Индикатор вводился в центральную скважину и улавливался в наблюдательной, а также в стенках устья и в источнике, выходящем по трещине сбросового сдвига. Коэффициент действительной скорости $k_{д.т.}$ рассчитывается по формуле для условий квадратичного закона фильтрации

$$k_{д.т.} = \frac{r_1^2}{2t} \sqrt{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_1}}, \quad (6.2)$$

где r_1 — расстояние до наблюдательной скважины от центральной; r_c — радиус центральной скважины; Δh_1 и Δh_2 — повышения уровня соответственно в центральной и наблюдательной скважинах; t — время прохождения индикатором расстояния между центральной и наблюдательной скважинами.

Аналогична формула для линейного закона

$$k_d = \frac{r_1^2}{2t} \cdot \frac{\ln r_1 - \ln r_c}{\Delta h_1 - \Delta h_2}. \quad (6.3)$$

В 1931 г. считалось, что в трещиноватых породах фильтрация всегда подчиняется квадратичному закону. Несколько позднее была получена формула для определения k_d при линейном законе фильтрации [15].

В зависимости от практических задач исследований величина k_d определяется по времени, соответствующему максимальной концентрации индикатора в пункте наблюдения или моменту его появления. Первый способ обоснован, но второй, дающий несколько завышенные значения k_d , применяется в случаях, когда желательно получить известный запас, например для обоснования скоростей движения подземных вод в основании плотин.

Формулы (6.2) и (6.3) не учитывают влияния конвективной диффузии, которой можно пренебречь, так же как для линейного потока. Однако конвективная диффузия имеет большое значение для установления концентрации индикатора в пункте наблюдения.

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии для случая ввода раствора индикатора в плановый радиальный ламинарный поток при закачке воды в скважину с расходом Q следующее [31]:

$$m \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q}{2\pi r M} \left(\lambda_1 \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (6.4)$$

где $C(r, t)$ — концентрация индикатора на расстоянии r от оси опытной скважины по истечении времени t от момента поступления индикатора в пласт; m — пористость; λ_1 — параметр рассеивания (индекс «1» указывает на рассеивание в направлении течения подземных вод; рассеиванием в других направлениях в данном случае можно пренебречь).

Приближенные решения, полученные Ф. М. Бочевеком, А. Е. Орадовской [24] и В. М. Шестаковым [162, 164], сложны и пока почти не применяются. Простой, но весьма ориентировочный способ определения необходимого количества индикатора указан ниже (см. § 9.1). В литературе рассматриваются также приближенные методы оценки влияния сорбции на концентрацию индикатора [31, 163].

§ 6.2. Применение геофизических методов

В данном параграфе кратко рассматриваются методы, не требующие наличия наблюдательных скважин или других пунктов для улавливания индикатора.

1. Метод заряженного тела применяется для пресных или слабоминерализованных вод, вскрытых одной скважиной или шурфом на глубине не более 100 м.

В скважину (или шурф) загружается поваренная соль (в удлиненных мешках) и спускается электрод. Образующаяся концентрическая зона соляного раствора с повышенной электропроводностью перемещается в направлении потока подземных вод. Через электрод, находящийся в скважине, и два других, заземляемых на расстоянии, в 10—12 раз большем мощности пласта, пропускается ток и производится периодическая съемка эквипотенциальных линий электрического поля, образующегося при замыкании тока. Таким образом, устанавливается скорость движений переднего фронта зоны раствора соли («заряженного тела»), примерно равная действительной скорости движения подземных вод u_d , рассчитываемой по формуле

$$u_d = \Delta l / t, \quad (6.5)$$

где Δl — перемещение внешней эквипотенциальной линии по лучу, близкому к направлению потока подземных вод, по отношению к ее первоначальному (базисному) положению; t — время этого перемещения.

Для уточнения результатов расчетов строится график зависимости (6.5) для разных значений t и по усредненной прямой находят u_d по формуле

$$u_d = \frac{\Delta l_2 - \Delta l_1}{t_2 - t_1}, \quad (6.6)$$

где Δl_1 , Δl_2 и t_1 , t_2 — смещение и время от начала опыта, соответствующие двум точкам усредненной прямой.

При опытной скважине, закрепленной обсадными трубами, в приведенные формулы вводятся поправки [145].

При изучении водоносных горизонтов, разделяющихся по вертикали на этажи с различной проницаемостью пород, соль вводится на различных глубинах и для каждого этажа отдельно определяется u_d .

Величина k_d находится путем деления u_d на гидравлический градиент.

2. Определение действительной скорости движения подземных вод по измерению диффузионно-абсорбционного электрического потенциала может дополнять метод заряженного тела. Это обусловлено возникновением разности потенциалов на границе между соленой и пресной водой. Перепад потенциалов на этой границе будет перемещаться со скоростью, близкой к действительной скорости движения подземных вод.

Указанный метод еще не получил распространения, но представляется перспективным для неглубоко залегающих водоносных горизонтов.

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА
ФИЛЬТРАЦИИ В КВАДРАТИЧНЫЙ**

**§ 6.3. Фильтрационные параметры и зависимости
для откачек и нагнетаний**

Отклонения от закона Дарси при градиентах напора больше критических обычно захватывают лишь внутреннюю часть воронки депрессии, а во внешней части этой области движения подземных вод подчиняются линейному закону. Такие представления и соответствующие зависимости имеются в работах А. С. Храмушева [156], Н. К. Гиринского [43], В. М. Шестакова [162], Е. Е. Керкиса [65] и других.

На основе этих представлений автор получил зависимости для определения притока воды к скважинам, полагая, что во внутренней части области депрессии движение подземных вод подчиняется квадратичному закону и переходной зоной с промежуточной зависимостью можно пренебречь. Полученные зависимости значительно проще соответствующих другим нелинейным законам, но достаточно точны для определения фильтрационных параметров и большинства практических расчетов. Кроме того, для характеристики установившегося движения подземных вод достаточно только двух параметров: коэффициента фильтрации при линейном законе и критического градиента; остальные расчетные величины могут быть определены по этим двум параметрам.

При принятых положениях понижение уровня в скважине во время откачки из напорного горизонта определяется зависимостью

$$S_c = S_1 + S_2 = \frac{Q}{2\pi kM} (\ln R - \ln r_b) + \left(\frac{Q}{2\pi k_T M} \right)^2 \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_b} \right), \quad (6.7)$$

где S_1 и S_2 — понижения уровня на внешней границе внутренней и внешней частей воронки депрессии; r_b — радиус внутренней части; k_T — коэффициент фильтрации [при квадратичном законе].

Замена в формуле (6.7) величины k_T выражением (3.26) $k_T = k\sqrt{I_{кр}}$ и зависимость $I_{кр}$ от радиуса r_b

$$I_{кр} = \frac{Q}{2\pi kM r_b} \quad (6.8)$$

после преобразования дает

$$S_c = \frac{Q}{2\pi kM} \left(\ln R - \ln r_b + \frac{r_b}{r_c} - 1 \right). \quad (6.9)$$

Формула (6.9) действительна также для нагнетаний и наливов при замене понижения уровня S_c повышением Δh_c .

Для понижения (или повышения) уровня S_n в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии r_n от центральной во внешней зоне, т. е. при $r_n > r_b$, формула (6.9) приобретает вид

$$S_c - S_n = \frac{Q}{2\pi kM} \left(\ln r_n - \lg r_b + \frac{r_n}{r_b} - 1 \right). \quad (6.10)$$

Для безнапорных вод при небольших понижениях уровня приведенные формулы могут применяться как приближенные после замены мощности M усредненной глубиной безнапорного горизонта.

§ 6.4. Зависимости для определения параметров

В рассматриваемых условиях основными параметрами, как было указано выше, являются критический градиент $I_{кр}$ и коэффициент фильтрации k при $I < I_{кр}$, т. е. при линейном законе фильтрации.

Определение параметров по данным исследования одиночных скважин производится по следующим формулам.

Коэффициент фильтрации рассчитывается по формуле Дюпюя по расходу и понижению уровня, при которых еще не возникает отклонений от закона Дарси, соответствующих прямолинейной части графика зависимости Q от S_c или Q от $S_c (2H - S_c)$ для безнапорных вод (при откачке).

Отклонения от линейной зависимости между величинами Q и S_c могут быть следствием потерь напора при движении воды по стволу скважины, что нередко наблюдается у глубоких скважин, вскрывших напорные горизонты. Если отклонений от закона Дарси в пласте еще не возникло, то введение поправок в величину S_c по формулам трубой гидравлики устраняет нелинейный вид этой зависимости.

Определение $I_{кр}$ для одиночной скважины может быть произведено по формуле

$$I_{кр} = \frac{Q_n}{2\pi kM r_c}, \quad (6.11)$$

где Q_n — расход воды, соответствующий появлению зоны, для которой действителен квадратичный закон фильтрации.

Для определения расхода Q_n откачку или нагнетание следует проводить при нескольких понижениях (повышениях) уровня и строить график зависимости между S_c (или Δh_c) и расходом в логарифмическом масштабе. Линейной зависимости между этими величинами на графике соответствует прямая линия, наклоненная под углом 45° к осям координат, квадратичной — прямая с уклоном $63^\circ 25'$ к оси, где наносятся величины $\lg Q$. При квадратичном законе фильтрации, захватывающем только часть области депрессии, постепенно увеличивающуюся при повышении расхода, эта линия кривая, но при распространении квадратичного закона на $1/5$ — $1/4$ диаметра воронки депрессии уже мало откло-

няется от прямой с уклоном $63^{\circ} 25'$, что облегчает интерполяцию, производимую для нахождения Q_n (рис. 6.1). В работе автора [65] приведены также другие способы определения $I_{кр}$, в том числе по данным кустовых откачек.

Примером определения критического градиента по данным групповой откачки является пробное водопонижение напорных

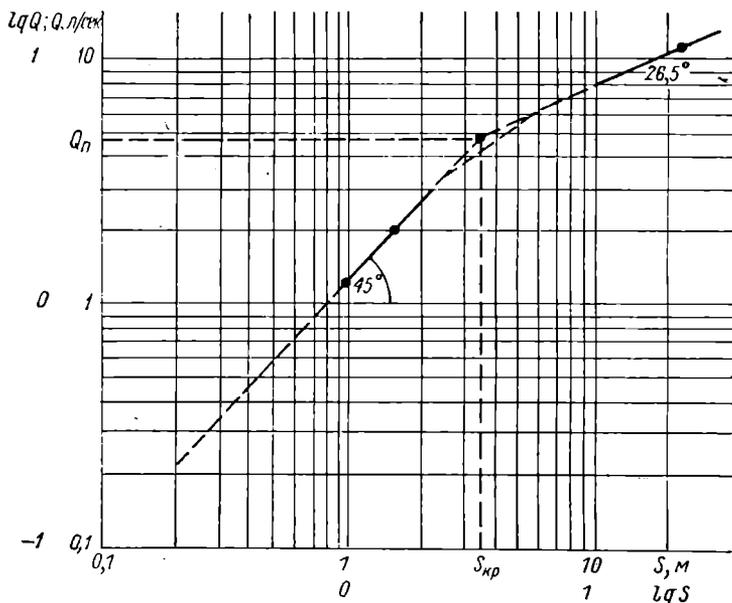


Рис. 6.1

График зависимости между расходом скважины при откачке и понижением уровня в логарифмическом масштабе.

Q_n — переход линейного закона в квадратичный; водоносный горизонт напорный.

вод горизонта лихвинских доломитов на Селижаровском буровом месторождении [116], где дебит водопонижительной установки непрерывно возрастал вследствие ввода новых скважин и достиг $1800\text{--}2000\text{ м}^3/\text{ч}$ к сентябрю 1950 г., когда число водопонижительных скважин увеличилось до 7. Замеры уровня в нескольких наблюдательных скважинах указывали на закономерное его понижение, примерно пропорциональное общему дебиту, что дало возможность рассчитать коэффициент водопроницаемости доломитов в нескольких вариантах по формуле Аргунова (4.29), причем различные варианты расчета дали почти одинаковые результаты ($k = 55 \div 60$ м/сутки). Понижение уровня в водопонижительных скважинах оказалось на $25\text{--}50$ м больше соответствующего линейному закону вследствие развития турбулентного движения в зоне пород, окружавших эти скважины. Расчет $I_{кр}$ дал величины его от 0,04 до 0,06.

§ 6.5. Установившееся движение подземных вод

Интегрирование дифференциального уравнения планового радиального установившегося потока подземных вод при наличии перетока (3.11) и условий, перечисленных в § 3.2, дает следующее уравнение депрессионной поверхности [43]:

$$S = S_c \frac{K_0(r \sqrt{\zeta})}{K_0(r_c \sqrt{\zeta})}, \quad (6.12)$$

где S — понижение напора на расстоянии r от оси опытной скважины; S_c — то же, на водопримной поверхности опытной скважины; K_0 — обозначение функций Бесселя от мнимого аргумента нулевого порядка; ζ — коэффициент связи (параметр перетекания), зависимость которого от коэффициентов фильтрации и мощности разделяющих слабопроницаемых пластов также была приведена в § 3.2.

Следствием формулы (6.12) является зависимость для определения параметра ζ по данным кустовой откачки

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{K_0(r_1 \sqrt{\zeta})}{K_0(r_2 \sqrt{\zeta})} \quad (6.13)$$

где S_1 и S_2 — понижения уровня в двух наблюдательных скважинах, находящихся на расстоянии соответственно r_1 и r_2 от оси центральной.

Параметр ζ находится методом подстановки значений функций Бесселя. Расчеты значительно упрощаются, если производить их по номограмме, составленной автором [69].

Уравнение (6.12) применимо также для расчета ζ при одной наблюдательной скважине, если заменить понижение S понижением S_c в опытной скважине и соответственно аргумент K_0 — величиной $r_c \sqrt{\zeta}$ или лучше ввести в формулу (6.12) приближенные значения функции K_0 при малом аргументе $\ln(1,12 r_c \sqrt{\zeta})$.

§ 6.6. Неустановившееся движение подземных вод

Параметр ζ и другие параметры пласта при перетоке определяются на основании зависимости, полученной М. С. Хантушем и Н. Р. Джекобом [152] в результате интегрирования приведенного выше дифференциального уравнения (3.34):

$$S = \frac{Q}{4\pi kM} W(u, r, \zeta), \quad (6.14)$$

где W — обозначение функции, называемой М. С. Хантушем «функцией скважины»; $u = r^2/4\chi t$ — для папорных вод; $u =$

$= \frac{r^2 \varphi}{4kH_{\text{ср}t}} = \frac{r^2}{a_y t}$ — для безнапорных вод; φ — коэффициент водоотдачи; a_y — коэффициент увнепроводности. (Обозначения М. С. Хантуша изменены.)

Для водоносных горизонтов неограниченного распространения при пренебрежимо малом влиянии откачки на уровень воды в питающих горизонтах, из которых происходит переток, функция W имеет вид

$$W = \int_u^{\infty} \frac{\exp(-y - r^2/4\zeta y)}{y} dy = 2K_0(r\zeta) - \int_q^{\infty} \frac{\exp(-y - r^2/4\zeta y)}{y} dy, \quad (6.15)$$

где y — переменная интегрирования; K_0 — обозначение функции Бесселя второго рода нулевого порядка от мнимого аргумента; $q = \chi \zeta t$ — для напорных вод; $q = kH_{\text{ср}} \zeta t / \varphi = a_y \zeta t$ — для безнапорных вод.

Функция W подробно табулирована в работе М. С. Хантуша [152]. Ниже приведена сокращенная таблица значений этой функции [115] (табл. 6.1).

Таблица 6.1
Значения функции W в формуле (6.15)

u	rζ							
	0,001	0,01	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
0,0001	8,63	8,40						
0,001	6,33	7,31	5,83	3,51				
0,01	4,04	4,04	3,82	3,29	1,85			
0,1	1,823	1,823	1,805	1,753	1,442	0,849	0,228	
0,2	1,223	1,223	1,216	1,194	1,059	0,715	0,227	
0,5	0,56	0,56	0,558	0,553	0,521	0,421	0,194	
1,0	0,219	0,219	0,219	0,218	0,210	0,186	0,114	0,007
2,0	0,049	0,049	0,049	0,049	0,048	0,041	0,034	0,005
5,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0

При длительной откачке ($t \rightarrow \infty$) депрессионная воронка стабилизируется и понижение уровня в опытной скважине достигает максимальной величины, определяемой формулой (6.12) Н. И. Гиринского.

Для определения коэффициента связи и других параметров по данным откачки из одиночной скважины на основании формулы (6.14) в качестве исходных данных принимаются три различных понижения уровня в ней для трех промежутков времени, прошедшего от начала откачки. Это дает три уравнения с тремя неизвестными: kM , $\frac{r_c^2}{4\chi}$ или $\frac{r_c^2}{4a_y}$ и $r_c \zeta$, которые решаются методом подстановки или на ЭВМ с использованием таблицы значений

функции W . Расчет параметров по понижению уровня в наблюдательной скважине производится по той же схеме, но r_c в неизвестных величинах заменяется расстоянием до наблюдательной скважины от центральной.

Г Л А В А 7

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

§ 7.1. Метод откачки — нагнетания

Метод откачки — нагнетания, предложенный автором в 1954–1955 гг. [66], заключается в опыте, проводимом на двух одинаковых скважинах: одной — опытной, второй — поглощающей, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (5–20 м). Из опытной скважины проводится откачка, причем вся откачиваемая вода закачивается во вторую (поглощающую) скважину.

Коэффициент фильтрации рассчитывается по формуле Дюпюи, в которой величина R заменяется расстоянием $2a$ между опытной и поглощающей скважинами.

При наличии двух наблюдательных скважин расчет также производится по формуле Дюпюи (4.21), но r_1 и r_2 соответственно представляют собой расстояния до наблюдательной скважины от опытной и поглощающей. При одной наблюдательной скважине величина r_1 (или r_2) заменяется радиусом водоприемной части опытной скважины. Все приведенные формулы получены методом суперпозиции — наложением друг на друга фильтрационных полей опытной и поглощающей скважин.

Положительные стороны метода откачки — нагнетания следующие.

1. Границы водоносного пласта очень слабо влияют на результаты опытов, поэтому метод применим для замкнутых линз. Так, автором было установлено методом ЭГДА, что для круглой линзы, ограниченной непроницаемыми породами, при расположении опытной и поглощающей скважин на равных расстояниях от центра линзы расчет коэффициента фильтрации по формуле для двух скважин (при $2a/r_c = 50$) дает ошибки —25, —14, —5 и —1% при радиусе линзы b соответственно 1,5; 2; 3 и 5 a .

Такие же результаты дает полученная автором методом отражения источников-стоков формула для круглой линзы радиуса b :

$$k = \frac{Q}{2\pi S_c M} \ln \frac{2a(b^2 + a^2)}{r_c(b^2 - a^2)} \quad (7.1)$$

2. Основной фильтрационный поток направлен от поглощающей скважины к опытной, что дает возможность определять проницаемость пород в заданном направлении.

3. Установившееся движение наступает при опытах очень быстро, поэтому нет необходимости пользоваться зависимостями неустановившейся фильтрации.

Метод откачки — нагнетания дает возможность определять коэффициент фильтрации мерзлых пород после оттаивания и применялся для этой цели в районах развития многолетней мерзлоты. Для создания линзы талых пород оттаиваются мерзлые породы путем подачи в опытную, поглощающую и для ускорения также в дополнительные скважины горячей воды или пара, спуска электронагревателей и т. п.

Метод откачки — нагнетания нашел применение при решении фильтрационных задач, связанных с использованием глубинного тепла Земли [97].

§ 7.2. Определение водопроницаемости неоднородных закарстованных и трещиноватых пород по данным наблюдений над естественными потоками подземных вод, питаемых за счет инфильтрации

Водопроницаемость закарстованных и трещиноватых пород может быть определена по наблюдениям над водной поверхностью на водоразделах, что обычно дает для неоднородных пород лучшие результаты, чем опытные гидрогеологические работы. Это вызвано тем, что в таких породах данные исследования отдельных скважин очень сильно отличаются друг от друга, поэтому для получения правильных средних значений водопроницаемости может потребоваться непомерно большое число скважин. Нередко большая относительная высота водораздела и глубокое залегание подземных вод исключают возможность бурения необходимого числа скважин.

Формула, рекомендуемая Г. Н. Каменским и Н. Н. Биндеманом [14], представляет собой несколько видоизмененное уравнение поверхности безнапорного потока, питаемого за счет инфильтрации на водоразделе (водоупорное ложе считается горизонтальным):

$$k = \frac{w(L-x)}{\frac{y^2 - h_1^2}{x} + \frac{h_1^2 - h_2^2}{L}}, \quad (7.2)$$

где w — инфильтрация; y — глубина безнапорного потока на расстоянии x от одной из рек, ограничивающих водораздел (рис. 7.1); h_1 — глубина безнапорного потока при $x = 0$; h_2 — то же, при $x = L$; L — ширина водораздела.

Для определения k по данной формуле требуется пробурить на водоразделе только одну скважину и измерить в ней уровень воды. Величины h_1 и h_2 можно считать высотой уровня воды в реках, ограничивающих водораздел, над непроницаемым ложем и, таким образом, обойтись без бурения скважин на берегах.

Неточность нахождения k по формуле (7.2) вызвана преимущественно трудностью надежного определения и непостоянством инфильтрации. Но Н. Н. Биндеман правильно считает, что для закарстованных и сильнопроницаемых трещиноватых пород можно считать инфильтрацию соответствующей 70—80% от количества

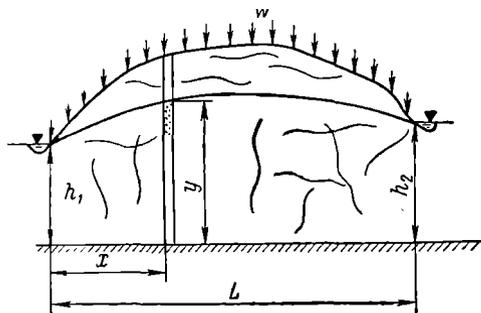


Рис. 7.1

Схема для определения среднего коэффициента водопроницаемости закарстованных или сильно и неравномерно трещиноватых пород по положению уровня на водоразделе, по Г. Н. Каменскому и Н. И. Биндеману [14].

атмосферных осадков, и при этом погрешность, зависящая от неточности значения просачивания, будет значительно меньше, чем при опытах всего на нескольких скважинах. Можно добавить еще, что при проведении стационарных гидрогеологических наблюдений над уровнем воды хотя бы на двух или трех скважинах величина w может быть достаточно надежно определена по зависимостям неустановившегося движения подземных вод [115].

Средний коэффициент водопроницаемости разнообразных пород, в частности очень неоднородных, может быть также определен по элементарным формулам, если известен уклон водной поверхности и есть возможность определить расход потока, например по дебиту источников, увеличению расхода водотоков, дренирующих подземные воды, и т. п.

§ 7.3. Методы расходомерии

Сущность расходомерии и ее значение для изучения фильтрационных свойств слоистых толщ были указаны в гл. 5. Расходомерию целесообразно применять для всех неоднородных пород, в частности для трещиноватых и закарстованных, так как она дает возможность установить положение отдельных трещин и трещиноватых зон с высокой проводимостью, а также карстовых каналов.

При исследованиях для гидротехнического строительства данные расходомерии позволяют более обоснованно наметить интер-

валы для нагнетаний и откачек и представляют собой ценное дополнение к результатам этих работ.

Основные способы производства расходомерии: измерение расхода воды в скважине специальными гидрометрическими вертушками и геофизические методы, основанные на применении резистивиметра и точного скважинного термометра. В настоящее время выпускаются серийно скважинные расходомеры ДАУ, ТСР и др. (см. табл. 9.1) [12]. Геофизические методы проводятся по следующим схемам.

Способ оттаргивания, применяемый при малых водопритоках, заключается во введении в скважину воды с удельным электрическим сопротивлением, меньшим или большим, чем у подземных вод, последующим отбором воды и измерением удельного электрического сопротивления ее по стволу скважины резистивиметром. При этом против водоносных слоев появляются участки пластовой воды с большим сопротивлением при пресной подземной воде и с меньшим — при минерализованной. Длина этих участков находится в прямой зависимости от водообильности слоев

При применении скважинных термометров скважину промывают водой с температурой, на $5-10^{\circ}\text{C}$ большей или меньшей температуры подземных вод, после чего производят оттаргивание и периодически термокаротаж. Места притоков воды на термограммах характеризуются температурными аномалиями, причем длина соответствующих участков позволяет ориентировочно судить об интенсивности водопритока. Со временем температурные аномалии исчезают, так как распределение температур стремится к первоначальному — естественному.

Способ продавливания, применяемый при значительных водопритоках, заключается в периодическом определении посредством резистивиметра или термометра границы раздела между водой, находившейся в скважине до опыта и введенной в последнюю, удельное электрическое сопротивление которой или температура имеют резко отличающуюся величину. При подаче в скважину воды эта граница перемещается книзу со скоростью, пропорциональной поглощению воды в нижележащих слоях, что позволяет определить водопроницаемость отдельных слоев.

И. И. Гринбаумом [47] разработаны методика и техника проведения опытов по рассматриваемому методу, проверенные им на ряде объектов и давшие вполне удовлетворительные результаты. В книге И. И. Гринбаума описана также необходимая аппаратура, приведен ряд практических указаний по проведению исследования скважин и помещены многочисленные примеры, а также описана методика расходомерии для пород, не насыщенных водой. Более подробно расходомерия и интерпретация ее результатов рассмотрены в литературе [12, 89].

§ 7.4. Определение скорости фильтрации по изменению концентрации индикатора в одной скважине (в зоне интенсивного водообмена)

Описываемый метод был предложен и осуществлен еще в 1912 г. известным русским гидрологом Д. И. Кочериным [47]. В настоящее время он применяется с небольшими дополнениями при использовании современной аппаратуры. Сущность метода заключается в следующем: в скважину вводится индикатор — раствор соли, красящее вещество и т. д., концентрация которого систематически устанавливается по удельной электропроводности (резистивиметрии) путем химического или электрохимического определения, а также фотоэлектрическим методом и т. п. Раствор индикатора постепенно вытесняется водой подземного потока, проходящего через скважину, что описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dC}{C-C_0} = -\pi d_c m_c u dt, \quad (7.3)$$

где C — переменная концентрация индикатора в скважине; C_0 — концентрация индикатора в подземных водах (для красящих веществ $C_0 = 0$); d_c — диаметр скважины, устанавливаемый с учетом кавернограмм; u — скорость фильтрации; m_c — отношение скорости движения воды через скважину к скорости фильтрации, теоретически $m_c = 2$, что было установлено С. А. Кодем [78], но m_c может быть большим двух при пониженной проницаемости степени фильтра; t — время.

Интегрирование приведенного уравнения в пределах для C , C_1 и C_2 и для времени t — t_1 и t_2 дает

$$u = \frac{1.81 d_c}{m_c (t_2 - t_1)} \lg \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0}, \quad (7.4)$$

где C_1 и C_2 — концентрация индикатора при времени t_1 и t_2 , прошедшем от начала опыта.

Более подробные сведения имеются в книге И. И. Гринбаума, статье Н. А. Огильви [113] и «Справочном руководстве гидрогеолога» [145].

§ 7.5. Методы определения фильтрационных параметров посредством испытателей пластов и опережающего опробования

Испытатели пластов начали применяться при разведке нефтяных месторождений первоначально в США [179], а затем в европейских странах [177]. В СССР применение испытателей пластов

началось также при разведке нефтяных и газовых месторождений примерно в 1958 г., а затем и при гидрогеологических исследованиях. В настоящее время у нас разработан ряд конструкций испытателей пластов, спускаемых в скважину на бурильных трубах или на каротажном кабеле, а также другие конструкции [12, 89].

Исследование скважин испытателями пластов является экспресс-методом, позволяющим в короткое время получить предварительную характеристику изучаемого водоносного горизонта. Посредством испытателя пластов приблизительно оцениваются основные фильтрационные параметры для отдельных интервалов водоносного горизонта еще в процессе бурения.

Исследование скважин с помощью испытателя пластов заключается в изоляции опробуемого интервала водоносного горизонта пакером, после чего быстро создается интенсивный, но быстро уменьшающийся приток воды в свободное пространство бурильных труб или в специальный баллон у опробователей, спускаемых на кабеле. Свободный приток в бурильные трубы может продолжаться до установления в них статического уровня или быть прекращенным раньше.

Приток воды в бурильные трубы или в баллон возникает при открытии клапана в нижней части испытателя (клапан открывается с помощью гидравлического реле времени, посыльного груза или других приспособлений). При наличии второго клапана в средней части бурильных труб свободный приток воды в них прекращается при закрытии этого клапана, и дальнейшее восстановление происходит при незначительном водопритоке, обусловленном упругим сжатием воды, находящейся в трубах, и упругими деформациями их и других деталей испытателя.

Регистрация давления происходит автоматически с помощью глубинных манометров; обычно устанавливается два манометра — один против исследуемого интервала и второй на меньшей глубине.

У некоторых конструкций испытателей есть также приспособление для автоматической записи дебита водопритока.

Продолжительность периода притока воды обычно от 20 мин до нескольких часов.

Для определения фильтрационных параметров служат эмпирические зависимости давления и дебита водопритока от времени в периоды свободного водопритока в бурильные трубы или в баллон, а также в период восстановления давления после закрытия верхнего клапана у испытателей, спускаемых на трубах. Для испытателей пластов, позволяющих производить откачки или микрооткачки через бурильные трубы, расчеты параметров по данным этих опытов выполняются по обычным формулам для несовершенных скважин.

Давление определяется по «картам» глубинных манометров, дебт в период заполнения бурильных труб рассчитывается (исключо-

чая короткий период открытия нижнего клапана и поступления воды в трубы) по формуле

$$Q(t) = -\pi r_{\text{тр}}^2 \frac{dS}{dt}, \quad (7.5)$$

где $r_{\text{тр}}$ — внутренний радиус бурильных труб; S — понижение уровня в бурильных трубах, отсчитываемое от статического уровня.

После закрытия верхнего клапана дебит может рассчитываться по формуле (4.46). У испытателей, спускаемых на кабеле, дебит водопритока в баллон рассчитывается по сжатию воздуха, находящегося в баллоне, соответствующему давлению и температуре в нем.

Расчет параметров водопроницаемости kM и коэффициента пьезопроводности χ при строгой постановке вопроса должен быть произведен по формулам (4.49), (4.50), (4.51), основанным на интегральном преобразовании Лапласа.

В статье Ж. Жессона [177] указывается приближенный метод расчетов, проводимых по данным опытов с испытателем пластов, позволяющий определить влияние на водоприток фильтрационных сопротивлений, вызванных неполной деглиннизацией пород перед опытом (так называемый «скин-эффект»), и внести поправки в определяемые значения параметров. Поскольку полная деглиннизация часто затруднительна, особенно для неглубоких скважин, предлагаемые в этой статье методы расчетов могут иметь существенное значение для уточнения параметров, полученных при работе с испытателем пластов.

Принципиальная схема опережающего опробования была предложена К. В. Симоновым (ВСЕГИНГЕО) в 1956 г.; одновременно В. И. Блажковым (Краснодарская комплексная геологоразведочная экспедиция) создана конструкция опробователя [17].

Сущность метода опережающего опробования: при встрече водоносного пласта, представленного рыхлыми породами, в него погружается на бурильных трубах при интенсивной промывке чистой водой фильтр-опробователь. Погружение на глубину 1,2—1,5 м (иногда 2 м) занимает всего несколько минут. Затем через бурильные трубы производится откачка поршневым насосом или эрлифтом, а после ее окончания прослеживается ход восстановления уровня. Замеры уровня производятся пневматическим уровнемером ПУР.

Параметры рассчитываются по формулам для несовершенных скважин; возможно также использование графика восстановления уровня.

Применение опережающего опробования целесообразно при бурении поисково-съёмочных и разведочных скважин на воду в рыхлых отложениях при наличии нескольких водоносных горизонтов; проводить его желательно в комплексе с геофизическими работами.

§ 7.6. Основы методов определения фильтрационных параметров горных пород в зоне аэрации и на границе ее с водоносной зоной

Значительная неточность количественной оценки пустотности трещиноватых и закарстованных пород по данным документации горных выработок и тем более скважин и естественных обнажений была указана в первой части книги (см. § 2.2).

Рекомендуемая автором схема расчетов по увеличению объема депрессионной воронки в начальный период откачки из безнапорного водоносного горизонта обычно дает более точные результаты.

Пустотность φ по данным начального периода кустовой откачки из безнапорного водоносного горизонта определяется по формулам

$$\varphi = \frac{V}{Q_{\text{ср}} t}; \quad (7.6)$$

$$\varphi = \frac{V_2 - V_1}{Q_{\text{ср}} (t_2 - t_1)} \bullet \quad (7.7)$$

где V — объем депрессионной воронки, образовавшейся за время t , прошедшее от начала откачки; $V_2 - V_1$ — увеличение объема депрессионной воронки за промежуток времени $t_2 - t_1$; $Q_{\text{ср}}$ — средний дебит откачки за время t или $t_2 - t_1$; $Q_{\text{ср}} t$ — объем откачанной воды, может быть измерен непосредственно счетчиком-водомером.

Очевидно, что точность расчета объема депрессионной воронки зависит от количества и расположения наблюдательных скважин. При наиболее распространенной схеме опытного куста (с двумя взаимно перпендикулярными лучами, относительно которых воронка симметрична) объем V может быть определен по методу горизонтальных сечений, т. е. по формуле

$$V = 2 \sum F_i \Delta h_i, \quad (7.8)$$

где F_i — средняя площадь одного сечения; Δh_i — расстояние по вертикали между смежными сечениями.

Приведенные формулы применимы и для закачек.

При откачке из одиночной скважины пустотность может быть определена (обычно менее точно, чем по предыдущему способу) по величине коэффициента уронепродности. Последний рассчитывается по графику восстановления уровня или зависимости понижения уровня от времени в полулогарифмическом масштабе (см. § 4.5).

Описанные методы применимы также для определения водоотдачи рыхлых пород, но у слабопроницаемых пород могут получаться заниженные значения φ вследствие неполного стекания к низу гравитационной воды, вызванного быстрым понижением

уровня при откачке. Этот фактор следует учитывать и при определении пустотности трещиноватых пород с низкой проницаемостью.

Опыты желательны производить в периоды незначительной инфильтрации атмосферных осадков, а также вдали от рек и других водоемов, способных питать водоносный горизонт во время откачки. При наличии режимной скважины, находящейся за пределами влияния откачки, возможно введение поправок на инфильтрацию по данным стационарных наблюдений над уровнем воды.

Методика широко распространенных опытов налива (инфильтрации) воды в шурфы, применявшихся еще в 1926 г. А. К. Бодыревым и проводимых для определения водопроницаемости «сухих» пород, описана во всех руководствах и учебниках [100], поэтому автор ограничивается лишь следующими замечаниями.

1. Задачей опытов может быть определение водопроницаемости пород при среднем водосодержании, наблюдаемом в естественных условиях, что необходимо, например, при исследовании орошаемых площадей, или в условиях полного насыщения породы водой, что производится для оценки потерь на фильтрацию из каналов, водохранилищ и т. д.

2. Для расчета коэффициента водопроницаемости грунта k_w насыщенного полностью водой, по величине k , полученной при опыте для ненасыщенного грунта с влажностью W , рекомендуется эмпирическая формула С. Ф. Аверьянова [81]:

$$k = k_w \left(\frac{W - W_0}{m - W_0} \right)^{3,5}, \quad (7.9)$$

где W — влажность грунта при опыте (в объемном выражении) W_0 — максимальная молекулярная влагоемкость; m — пористость.

Приведенный расчет можно приближенно произвести, пользуясь таблицей коэффициентов, соответствующих пористости ненасыщенной породы и объемной влажности, помещенной в книге Ф. М. Бочевера и других [115].

3. Наиболее совершенными методами опытов налива в шурфы и соответствующих расчетов являются предлагаемые Н. Н. Биндеманом и Н. К. Гиринским [115]. Оба метода учитывают влияние на инфильтрацию капиллярных сил, а метод Н. Н. Биндемана еще и неустановившийся характер инфильтрации.

4. Методика опытов и схема расчетов налива воды в скважину детально разработана Г. И. Баренблатом и В. М. Шестаковым [115], но требует, однако, наличия наблюдательной скважины.

5. При всех опытах определения фильтрационных свойств сухих пород следует учитывать отрицательную роль кольматации

§ 7.7. Определение фильтрационных параметров по данным опытов нагнетания воздуха

В СССР фильтрация газа через пористые породы изучалась в лабораториях б. Государственного научно-исследовательского нефтяного института и Московского государственного университета Л. С. Дейвизоном [91] и его учениками начиная примерно с 1930 г. в связи с вопросами разработки нефтяных и газовых месторождений. Позднее подобные работы проводились в Румынии Н. Кристеа [84] и в США А. Е. Шейдеггером [161] и М. Маскетом [100]. Лабораторные и теоретические исследования движения газа через плоские щели (модели трещин), аналогичные проведенным Г. М. Ломизе для воды, сделаны И. П. Гинзбургом [41] и Е. С. Роммом [133].

Нагнетания воздуха («сухие» породы начали применяться за рубежом при исследованиях для гидротехнического строительства примерно в 1955 г. Одним из первых исследователей, проводивших нагнетания воздуха для определения проницаемости трещиноватых известняков, был М. Ро; несколько позднее К. Шнеебели [168] проводил нагнетания воздуха для фильтрационной характеристики аллювиальных отложений основания плотины в Пиренеях.

Опыты применения нагнетания воздуха для оценки проницаемости трещиноватых пород и разработка методики и техники этих работ начаты были 1965 г. в Гидропроекте О. Г. Устрицевым [150] и другими исследователями [141] и продолжаются в настоящее время.

Метод приближенной оценки степени трещиноватости путем нагнетания воздуха в шпур (метод ВОТ) разработан в 1968 г. в Ленгидропроекте А. А. Сорокиным и другими специалистами [141] и применяется теперь при инженерно-гидрогеологических работах.

Метод нагнетания воздуха позволяет определить газопроницаемость (воздухопроницаемость) ненасыщенной водой породы и по формуле (3.5) рассчитать коэффициенты проницаемости и водопроницаемости.

Особенности метода нагнетания воздуха обусловлены низкой вязкостью газов, значительной их сжимаемостью, которой нельзя пренебрегать, и отсутствием гравитационного движения книзу в зоне азрации.

Вязкость воздуха при атмосферном давлении и температуре 0, 10, 20, 30 и 40° С соответственно 1,7; 1,76; 1,81; 1,86 и 1,9 из [149]. Таким образом, вязкость воздуха приблизительно в 170—180 раз меньше вязкости воды.

Зависимость вязкости газа от температуры выражается зависимостью [149]

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + c}{T + c} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (7.10)$$

где η и η_0 — вязкость газа при абсолютной температуре T и T_0 ; c — постоянная (для воздуха, равная 120).

Вязкость воздуха почти не зависит от давления, если оно мало отличается от атмосферного [40].

Вследствие незначительной вязкости воздуха опыты производятся при давлениях, обычно не превышающих 2—3 кгс/см², а для пород высокой проницаемости иногда измерить давление не удается даже посредством микроманометров.

При давлении и температуре, обычных для опытов, уравнение состояния воздуха с большой точностью определяется формулой Клапейрона для идеального газа

$$p = \rho RT, \quad (7.11)$$

где p — давление; ρ — плотность; T — абсолютная температура; R — газовая постоянная.

В зависимости от геологического строения и задач исследований применяются следующие схемы проведения опытных нагнетаний воздуха и расчетов параметров [150].

1. При однородном пласте постоянной ограниченной мощности M наиболее целесообразной является схема проведения опыта с одной или двумя наблюдательными скважинами (пьезометрами).

При установившемся режиме фильтрации в совершенной опытной скважине, т. е. нагнетании воздуха по всей мощности пласта, коэффициент фильтрации (для воды) определяется по формуле Дюпюи, преобразованной для газа [150]:

$$k = \frac{Q \gamma_g \eta_g (\ln r_2 - \ln r_1)}{4\pi M \eta \Delta p}, \quad (7.12)$$

где Q — объемный дебит газа, приведенный к среднему давлению $p_{cp} = 0,5 (p_1 + p_2)$; p_1 и p_2 — давление воздуха соответственно в первой и второй наблюдательных скважинах (при одной наблюдательной скважине $p_1 = p_c$ — давление воздуха в опытной скважине на уровне исследуемого пласта); γ_g — плотность воздуха при среднем давлении p_{cp} и средней температуре его при опыте, рассчитываемая на основании формулы (7.11) (величина $Q \gamma_g$ равна массовому дебиту воздуха); η_g — вязкость воздуха при средней температуре его во время опыта; η — то же, для воды при температуре, для которой желательно получить коэффициент фильтрации воды; r_1 и r_2 — расстояния от опытной скважины до наблюдательных (при одной наблюдательной скважине $r_1 = r_c$; $\Delta p = p_1 - p_2$ — перепад давления).

Опыты нагнетания воздуха могут сопровождаться определением действительной скорости его движения, для чего служит газообразный индикатор, например гелий, определяемый физико-химическими методами. Такие опыты позволяют определить пустотность пород m .

Для неустановившегося режима фильтрации применяются формулы (4.36) и (4.37), причем первая из них приобретает вид

$$k = - \frac{Q \gamma_r g \eta_r}{4 \pi M \eta \Delta p} E_1 \left(- \frac{r^2}{4 \chi_r t} \right), \quad (7.13)$$

где χ_r — коэффициент пьезопроводности для газа.

Для нагнетания воздуха в несовершенные скважины применяется преобразованная для газа формула Гиринского — Бабушкина для неограниченного пласта (4.12), а также некоторые другие формулы, приведенные в работах О. Г. Устрицева [150].

2. Нагнетание воздуха в слоистые и неоднородные породы может производиться поинтервально при изоляции выделяемых участков скважины тампонирующими приборами. Этот способ имеет значение для пород высокой проницаемости при невозможности создать давление у исследуемого горизонта значительной мощности.

3. В процессе нагнетания воздуха может производиться расходомерия (газометрия), т. е., так же как для воды, измерение расхода газа вдоль ствола скважины. Для этой цели служат специальные датчики, спускаемые в скважину, и регистрирующая аппаратура, устанавливаемая на поверхности. Результаты газометрии аналогичны получаемым при нагнетании воды.

4. Д. Шнеебели проводил нагнетания воздуха на опытном кусте с центральной скважиной глубиной 7 м и с семью наблюдательными скважинами, расположенными на взаимно перпендикулярных лучах на расстоянии от 1 до 6 м от центральной. По данным опытов определены параметры фильтрационной анизотропии аллювия. К сожалению, информация о проведенных опытах в статье Д. Шнеебели очень неполная: не указаны расчетные зависимости, коэффициент фильтрации аллювия и многие существенные фактические данные [168].

5. Упомянутый выше метод ВОТ предназначен для условной оценки степени трещиноватости (точнее, трещинной проницаемости) необводненных твердых пород [141].

За меру степени трещиноватости принимается скорость падения давления воздуха, нагнетаемого в короткий изолированный интервал шнура при строго определенных условиях: постоянном внутреннем объеме питающей системы, длине опробуемого интервала ($l = 0,5$ м, в породах высокой проницаемости 0,25 м), диаметре шнура (42—44 мм), начальном давлении воздуха ($p_n = 3$ кгс/см²), периоде наблюдения за падением давления ($t = 1$ мин). Опыты проводятся из горных выработок или с поверхности, длина шнуров до 4,6 м, опробуемые интервалы изолируются двойным пневматическим тампоном.

По данным опытов рассчитывается удельная воздухопроницаемость по формуле

$$v = \frac{p_n - p_k}{tl}, \quad (7.14)$$

где p_n и p_k — начальное и конечное давления за период наблюдения t ; l — длина опробуемого материала.

Максимальные значения v могут достигать 13—15 (кгс/см²)/(мин·м). В статье А. А. Сорокина [141] дается классификация пород по величине удельной воздухопроницаемости.

Метод ВОТ при исследованиях для гидротехнического строительства дает возможность четко выделить зону пород, разрушенных выветриванием, а также участки тектонической нарушенности пород, фиксировать положение крупных трещин и судить о фильтрационной анизотропии пород. Метод следует применять в комплексе с геофизическими, обычными опытными фильтрационными и геотехническими работами и стремиться установить корреляционные связи между различными показателями. Метод может применяться также при строительных работах для оценки искусственно создавшейся трещиноватости в сухих котлованах и выемках.

Определение фильтрационных свойств необводненных пород путем нагнетания воздуха имеет ряд преимуществ по сравнению с другими:

1) опыты можно производить для неводостойких пород — растворимых в воде, легко размываемых и т. п., а также для многолетнемерзлых пород с проводящими каналами и полостями;

2) опыты дают возможность определить коэффициент фильтрации очень слабопроницаемых пород; это имеет, в частности, значение для определения плотности цементационных завес и бетона;

3) не происходит гравитационного движения книзу по крупным трещинам, вызывающего обычно невозможность определения коэффициента фильтрации сухих пород по данным поинтервальных нагнетаний воды;

4) не нужна подачи воды для опытов, требующей специальных устройств или транспортных средств при значительной относительной высоте устья скважины;

5) преимущество нагнетаний воздуха по сравнению с наливками в шурфы заключается в возможности исследовать значительную толщу неоднородных пород и получить более полную характеристику фильтрационных свойств.

Для установления надежных результатов описанных опытов необходима тщательная подготовка скважин (удаление с их стенок бурового шлама интенсивной продувкой и другими способами); при наличии в трещинах глинистого материала воздух должен быть сухим (влажность не выше 70%) во избежание конденсации влаги в трещинах и разбухания глины. Измерительная аппаратура должна быть чувствительной и точной; желательно применение самописцев для регистрации дебита и давления.

Опытные нагнетания воздуха являются новым перспективным методом, требующим, однако, дальнейшей разработки и более широкой проверки. Подробное теоретическое обоснование метода нагнетания воздуха приведено в работе Н. Н. Веригина и Е. С. Дзекера [30].

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

**МЕТОДИКА
И ТЕХНИКА ОПЫТНЫХ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
РАБОТ**

**ВИДЫ ОПЫТНЫХ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ,
ИХ ОБЪЕМ,
РАЗМЕЩЕНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ
ОПЫТНЫХ СКВАЖИН И КУСТОВ**

**УСТАНОВЛЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ ОБЪЕМА
И ВИДОВ ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ
И МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОПЫТНЫХ СКВАЖИН
И КУСТОВ**

**§ 8.1. Виды опытных гидрогеологических работ,
их назначение и результаты**

Опытные гидрогеологические работы в зависимости от схем движения подземных вод, продолжительности, условий проведения и назначения опытов подразделяются на виды, основные сведения о которых приведены в табл. 8.1. В дополнение к данным табл. 8.1 необходимо указать следующее.

1. Продолжительность опытных гидрогеологических работ, указанная в таблице, может быть значительно сокращена (исключая длительные опыты — опытно-эксплуатационные откачки и длительные нагнетания). Это может быть достигнуто за счет их прекращения при явно неустановившемся режиме, уменьшения числа понижений напора при откачках, применения новой аппаратуры, позволяющей точнее измерять дебит и динамический уровень или давление и свести к минимуму их колебания, а также внедрения качественного оборудования, дающего возможность проводить опыты почти без перерывов.

2. Кустовые откачки или нагнетания следует проводить главным образом для водоносных горизонтов со значительной водообильностью и только после изучения последних более простыми методами и установления характерных участков для выполнения этих дорогостоящих опытов (см. ниже). Если не ставится специальных задач (определения коэффициента действительной скорости, параметров фильтрационной анизотропии, входных потерь

напора и т. д.), а также не требуется повышенной точности значений основных параметров, то во многих случаях можно обойтись без кустовых откачек или нагнетаний.

§ 8.2. Рекомендации по установлению объема и методов опытных гидрогеологических работ, выбора местоположения опытных скважин или шурфов

Число опытов, необходимое для получения обоснованных средних значений фильтрационных параметров, зависит от ряда факторов. Главнейшие из них степень сложности геологического строения и гидрогеологических условий, степень постоянства фильтрационных свойств исследуемых горизонтов, а также назначение работ, т. е. вид и масштаб народнохозяйственных объектов, для обоснования проектов которых производятся опытные работы. Существенное значение также имеет водопроводимость изучаемых проницаемых горизонтов или зон, поскольку требуемая точность определяемых параметров связана с ней прямой зависимостью.

Принципы установления необходимого объема опытных гидрогеологических работ сложны и вообще разработаны недостаточно, полной всего они установлены для исследований, связанных с гидротехническим строительством [54, 145] и прогнозом водопритоков в горные выработки [125]. В широкой практике объем выполняемых опытных работ бывает иногда мало обоснованным и при сложных условиях недостаточным вследствие ограниченных финансовых и материальных возможностей организаций, производящих исследования.

Весьма существенно обоснованно установить местоположение опытных скважин и особенно опытных гидрогеологических кустов, что проводится иногда формально (например, расположение скважин по правильной сетке), а это при сложных условиях недопустимо.

Число опытов, указанное в табл. 8.2, служит для предварительной общей ориентировки, но в конкретных случаях может быть изменено. По степени сложности условия делятся на три категории.

1. Простые условия — изучаемые горизонты представлены спокойной залегающими пористыми или равномерно-трещиноватыми породами. Тектонические нарушения отсутствуют. По степени изменчивости водопроводимости эти горизонты относятся к группе постоянных (однородных) и слабоизменчивых пород (см. табл. 1.1). Проницаемость пород данной категории средняя или более низкая.

Такие условия характерны для большей части Русской платформы. Примеры их приведены нами ранее (см. гл. 2) — это комплекс нижнекембрийских отложений в районе Ленинграда, среднедевонские отложения района г. Тамбова, водоносный горизонт,

Таблица 8.1

Основные виды опытных гидрогеологических работ

Виды опытных работ	Условия проведения опытов	Схема движения и режим подземных вод	Примерная продолжительность опыта, сутки	Получаемые параметры и назначение опытных работ
Откачки пробные	Из одиночных скважин или шурфов	Сходящаяся, близкое к радиальному. Преимущественно неустановившийся режим	1—7	Удельный дебит. Водопроницаемость, коэффициент фильтрации (проницаемость) не очень точно. Приблизительно коэффициент пьезопроводности или уровннепроводности и критический градиент при отклонениях от закона Дарси. Возможно определение порядка величины радиуса влияния. Проводится преимущественно при предварительных исследованиях
	Кустовые	То же	2—10	Те же параметры, но более точно. Коэффициент действительной скорости k_d . Пустотность для безнапорных вод. Производятся преимущественно для неглубоких горизонтов в стадии детальных исследований
Откачки опытные	Из одиночных скважин или шурфов	То же, но часто режим близок к установившемуся	6—24	Те же параметры, что при пробных откачках. Большая продолжительность опытов предусмотрена для стабилизации химического состава, газо-содержания и температуры воды при их неостоятельстве во время откачки.

	Кустовые	То же	До 30	<p>Проводится при изучении глубоких горизонтов минерализованных и термальных вод, а также при исследованиях для водоснабжения и ирригации</p> <p>Те же параметры, но наиболее точно; критический градиент различными способами. Коэффициент связи при перетоке.</p> <p>Параметры фильтрационной анизотропии в однородных породах.</p> <p>Проводятся при ответственных исследованиях: для водоснабжения, прогноза водопритоков в горные выработки, крупного гидротехнического строительства и ирригации, преимущественно для водоносных горизонтов высокой водообильности. Для определения проницаемости непостоянных закарстованных и трещиноватых пород часто нецелесообразны</p>
Откачки опытно-эксплуатационные	Из одиночных скважин и кустовые	То же, но режим в конце опыта практически установившийся	До нескольких месяцев	<p>Выяснение условий длительной работы эксплуатационных, водопонизительных и других скважин. Могут быть определены те же параметры, что и при опытных откачках</p>
Нагнетания и наливы	Суммарные для одиночных скважин	Близкое к плановому радиальному, расходящееся. Режим не вполне установившийся	До 10	<p>Те же параметры, что при откачках. Нагнетания и наливы в одиночные скважины для слаботрециноватых и мелкопористых пород часто дают занижение значения проницаемости вследствие кольматации приствольной зоны.</p> <p>Применяются в комплексе с поинтервальными нагнетаниями при исследованиях для гидротехнического строительства. Проводятся для предварительной оценки приемистости поглощающих скважин</p>

Виды опытных работ	Условия проведения опытов	Схема движения и режим подземных вод	Примерная продолжительность опыта, сутки	Полученные параметры и назначение опытных работ
Откачки нагнетания	Полуперерывные	Пространственное расходящееся. Режим близок к установившемуся	До 1—2	Удельное водопоглощение. Для пород, насыщенных водой, ориентировочно коэффициент фильтрации. При проведении опытов по схеме Люжона продолжительность уменьшается во много раз. Проводятся для трещиноватых пород при исследованиях для гидротехнического строительства
	Длительные нагнетания	Плановое радиальное, расходящееся. Режим практически установившийся	До нескольких месяцев	Проводятся для выяснения условий длительной работы поглощающих скважин. Могут быть точно определены различные параметры
	Откачки из опытной скважины и закачка всей воды в поглощающую скважину. Желательно наличие наблюдательных скважин	Сложное, преимущественно направленное от поглощающей скважины к опытной. Режим практически установившийся	0,5—2	Параметры установившейся фильтрации. Проводятся для линз, сильно неоднородных в плане, и таликов (естественных и искусственных) в мерзлых породах. Метод применим в обычных условиях
Наливы в шурфы	Наливы производятся в шурфы, пройденные из горных выработок или с поверхности	Вертикальное, при градиенте, близком к единице	1—2	Проницаемость пород в зоне аэрации

Расходомерия	Измерение расхода воды, движущейся по стволу скважины на различной глубине при откачке или нагнетании	Радиальное. Режим неустановившийся	0,3—1,0	Предварительная оценка водопроницаемых слоев и зон. Проводятся при исследовании слоистых и неоднородных по вертикали горных пород
Исследование скважин пспытателем пластов	Измерение расхода и давления при кратковременном интенсивном водопритоке	Радиальное различного вида. Режим резко неустановившийся	0,2—0,5	Экспресс-метод. Предварительная оценка водопроницаемости отдельных слоев, зон или интервалов водоносного пласта или толщи. Проводится преимущественно для глубоких горизонтов
Нагнетания воздуха	Измерение расхода и давления воздуха, нагнетаемого в необводненные породы на опытных кустах	Радиальное расходящееся. Режим преимущественно неустановившийся	—	Все параметры установившейся и неустановившейся фильтрации для пород, находящихся в зоне аэрации. Проводятся преимущественно при исследованиях для гидротехнических сооружений
	Измерения понижения давления воздуха, нагнетаемого в шпур в трещиноватых породах при стандартных условиях	Тот же, режим резко неустановившийся	—	Условная величина — удельная воздухопроницаемость. Опыты проводятся в зоне аэрации при исследованиях для плотин

Ориентировочный объем опытных гидрогеологических работ в различных условиях*

Назначение исследований	Предварительные исследования			Детальные исследования			Основные виды опытных работ
	Гидрогеологические условия						
	простые	сложные	очень сложные	простые	сложные	очень сложные	
Обоснование проектов высоких плотин **	1-3	3-10	10	2-10	10-40	40	1. Поинтервальные и суммарные нагнетания и откачки 2. Для трещиноватых пород в сложных условиях кустовые нагнетания и откачки с определением коэффициента действительной скорости движения подземных вод посредством индикаторов 3. Расходомерия 4. Нагнетания воздуха в сухие породы
	0,4-5	5-30	30	5-30	30-150	150	
	20-40	40-60	60	30-50	50-70	70	
	500-200	200-100	100	200-100	100-50	50	
Прогноз водопритоков в горные выработки	1-2	2-8	8	2-5	5-20	20	1. Пробные откачки из одиночных скважин 2. Для горизонтов значительной водообильности кустовые откачки 3. Расходомерия
	0,05-0,3	0,3-0,9	0,9	0,2-1	1-8	8	
	20-30	30-50	50	20-30	30-50	50-100	
Обоснование мероприятий ***	2000-1000	1000-750	750	1000-500	500-250	250	1. Пробные откачки преимущественно из одиночных скважин 2. Наливы воды в шурфы и скважины для характеристики пород в зоне аэрации 3. В сложных условиях опытные кустовые откачки 4. Расходомерия 5. Определение коэффициента связи (параметра перетекания)
	1-2	2-8	8	2-5	5-2	2	
	0,1-1	1-3	3	1-3	3-5	5	
	10-20	20-50	50	20-30	30-50	50	
	1000-500	500-400	400	500-300	300-100	100	

* Первая строка цифр—число опытных скважин, обеспечивающих необходимую обоснованность расчетных значений основных фильтрационных параметров; вторая—ориентировочное число опытных скважин на 1 км² исследуемой площади; третья—отношение числа опытных гидрогеологических скважин к общему числу разведочных скважин, %; четвертая—среднее расстояние между разведочными скважинами, м.

** При исследованиях для плотин расстояния между разведочными и опытными скважинами по основному створу (по оси плотины) в 2—2,5 раза больше, чем по параллельным створам.

*** Предусмотрены только объемы работ, проводимых на орошаемых или осушаемых площадях. Проницаемость пород на поливных площадях может существенно измениться вследствие физико-химического взаимодействия между поливной водой и дисперсной частью породы, а также воздействия на нее минеральных и других удобрений. Объем опытных работ иногда может быть сокращен при наличии надежных данных геофизических исследований [102].

приуроченный к угленосной свите визейского яруса нижнего карбона в средней части Русской платформы и в пределах Приуралья.

2. Сложные условия — исследуемые горизонты и комплексы представлены спокойно залегающими или дислоцированными разнообразными породами, но тектонические зоны и разломы с высокой проводимостью отсутствуют. Степень изменчивости пород не превышает группы изменчивых (неоднородных) (см. табл. 1.1), но в подчиненном количестве могут встречаться пласты или локальные участки сильно изменчивых пород (преимущественно трещиноватых или слабо закарстованных). Проницаемость пород преимущественно средняя, на небольших участках может быть высокой (оценка проницаемости дается по табл. 2.3).

Сложные гидрогеологические условия могут быть также следствием развития пород различного происхождения, возраста и состава, в том числе магматических, находящихся в контакте друг с другом и образующих единые сложные водоносные горизонты или необходимые проницаемые зоны. Подобные условия наблюдаются в горных и предгорных областях, а также в пределах низкогорных складчатых систем.

Примером сложных гидрогеологических условий (см. § 2.2, 2.4, 2.5) являются комплексы преимущественно терригенных угленосных отложений палеозойского возраста, развитых на западном склоне Урала, в Донбассе и Кузбассе.

3. Очень сложные условия — изучаемые проницаемые толщи или зоны представлены разнообразными породами, в том числе сильно закарстованными и трещиноватыми, преимущественно имеющими высокую и очень высокую, но неравномерную проницаемость. Породы могут быть сильнодислоцированными и пересеченными разломами с высокой проводимостью. По степени изменчивости фильтрационных свойств породы относятся к группам сильно и крайне изменчивых (см. табл. 1.1). Участки очень высокой проницаемости часто приурочены к тектоническим нарушениям, контактам, а в глубоких речных долинах также к трещинам бортового и донного отпора (см. табл. 2.2).

Особенно сложные условия характерны для комплексов разнообразных сильнонарушенных пород, представляющих в гидрогеологическом отношении одно целое. Такие условия имеют место, например, у мощной трещиноватой зоны метаморфических пород основания Саяно-Шушенской ГЭС (см. гл. 2).

Очень сложные гидрогеологические условия наблюдаются также в толщах четвертичных отложений, содержащих слои и линзы грубообломочных пород с весьма высокой проницаемостью.

Очень сложные гидрогеологические условия часто наблюдаются в горных районах, но иногда и при спокойном залегании горных пород в области предгорий и на территории платформы при развитии мощных толщ закарстованных пород.

При выборе местоположения опытных скважин и кустов необходимо руководствоваться следующими соображениями.

1. В районах со сложными и очень сложными гидрогеологическими условиями место заложения каждой опытной скважины должно быть тщательно обосновано во избежание случайных результатов.

2. При исследовании водоносных горизонтов в песчанированных или цементированных пористых породах опытные скважины следует бурить преимущественно в пунктах, где водопроницаемость изучаемого горизонта характерна (в первую очередь там, где она близка к средней, а затем на участках, где можно ожидать ее максимальной или минимальной величины). Предварительно следует оценить водопроницаемость по гранулометрическому составу и лабораторным определениям коэффициента фильтрации, а также по результатам простейших опытов, проводимых в процессе бурения, и данным каротажа (для цементированных пористых пород).

3. Для трещиноватых и закарстованных пород опытные скважины должны располагаться на участках максимальной водопроницаемости исследуемых водоносных горизонтов, где проходят основные водопроницающие трещины или капады. Такие участки выделяются на основании анализа всех имеющихся геологических, геоморфологических и гидрогеологических материалов, данных гидрогеологических наблюдений и простейших опытов, проводимых за время бурения, а также результатов геофизических работ.

4. При выборе местоположения опытных гидрогеологических кустов следует учитывать результаты предшествующих исследований одиночных скважин.

Для трещиноватых и закарстованных пород опытные кусты следует располагать на участках наибольшей водообильности исследуемых водоносных горизонтов.

При изучении неоднородных трещиноватых и закарстованных пород более рационально взамен опытных кустов увеличивать число одиночных опытных скважин, что позволит охарактеризовать большее количество пунктов и точнее установить средние значения гидрогеологических параметров.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА СКВАЖИН И ДРУГИХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

§ 8.3. Рекомендуемые способы бурения, оборудование и конструкция скважин для опытных гидрогеологических работ

Опытные скважины, предназначенные для проведения пробных или опытных откачек, должны удовлетворять определенным требованиям.

1. Бурение производится методами, позволяющими легко создать свободную гидравлическую связь между подземными водами исследуемого водоносного горизонта и столбом воды в скважине.

2. Смежные водоносные горизонты надежно изолируются от исследуемого, а также устраняется возможность проникновения в скважину во время откачки посторонней воды, например при возникновении временных потоков при обильных осадках и снеготаянии.

3. Диаметр рабочей (водоприемной) части скважин должен быть больше диаметра фильтра рациональной в данных условиях конструкции, а диаметр верхней части скважины должен обеспечить возможность спуска в нее насосных труб или глубинных насосов, габарит которых соответствует максимальному ожидаемому расходу воды во время откачки.

4. Опытная скважина по возможности оборудуется как гидродинамически совершенная, так как определение фильтрационных параметров по данным откачек из несовершенных скважин обычно менее точно. Однако для водоносных горизонтов большей мощности в неустойчивых породах вследствие трудности установки фильтров значительной длины приходится производить откачки из несовершенных скважин. Это может потребоваться также для водоносных горизонтов высокой водообильности с целью уменьшения дебита.

5. Оголовок опытной скважины должен позволять надежно измерять уровень воды, устьевое давление (при самоизливе) и дебит, отбирать пробы воды, а также спускать в скважину глубинные манометры, термометры, пробоотборники и т. п.).

6. Опытные и наблюдательные скважины могут буриться ударно-канатным, колонковым, роторным или турбинным, а также гидравлическим способами. Применяется также шнековое бурение.

Ударно-канатное механическое бурение может применяться в любых породах и производиться большим диаметром; оно является основным способом проходки галечников, особенно содержащих валуны.

Достоинством ударно-канатного бурения является возможность проведения его без промывки, так как глинистые слои и включения при промывке водой размываются, а в скважине образуется взвесь глинистых частиц, коагулирующая водоносные слои.

Колонковое бурение целесообразно применять при слабоизученном разрезе, представленном преимущественно скальными и полускальными, а также глинистыми породами, так как отбор керн обеспечивает хорошую геологическую документацию скважин. Промывку скважин в устойчивых породах следует вести чистой водой, а не глинистым раствором, что хотя и не дает возможности вполне избежать коагуляции пород водоносных горизонтов, но сводит ее к минимуму.

Колоноквое бурение мелких скважин в песках, песчано-галечных отложениях проводить не следует, так как возникает необходимость в глинистой промывке и последующей деглиннизации, нередко неосуществимой полностью.

Роторное бурение посредством передвижных установок в последнее время все чаще применяется при гидрогеологических работах, в частности для бурения опытных гидрогеологических скважин преимущественно при преобладании устойчивых пород, не требующих глинистой промывки.

Бурение с глинистой промывкой можно проводить для напорных горизонтов, залегающих на глубине, достаточной для того, чтобы при откачке до кровли горизонта создавался перепад давления в несколько килограмм-сил на квадратный сантиметр, в большинстве случаев позволяющий деглиннизировать породы со значительной проницаемостью, например закарстованные или пересеченные крупными водопрводящими трещинами. О возможности полной деглиннизации скважин следует судить лишь на основании опыта бурения и освоения скважин в данных условиях.

Гидравлический способ бурения скважин применим для песков, не содержащих гальки и валунов. Скважины глубиной до 20—30 м бурятся этим способом очень быстро, но породы вокруг скважины сильно нарушаются, что может быть причиной получения завышенного коэффициента фильтрации при откачке из одиночных скважин. Этот способ рекомендуется для наблюдательных скважин опытных гидрогеологических кустов.

Техническая характеристика станков для бурения скважин на воду приведена в сборниках ВСЕГИНГЕО [11, 108], а также в «Справочном руководстве гидрогеолога» [145].

Изоляция исследуемого горизонта от вышележащих производится обычными способами.

Перед откачкой следует производить проверку надежности тампонирувания скважины путем полного ее осушения, а для глубоких скважин также испытанием большим давлением. Техника тампонажных работ подробно рассмотрена в руководствах и справочниках по бурению [159, 160].

Изоляция исследуемого горизонта от водоносных пластов, расположенных на большей глубине (при исследовании скважины в направлении снизу вверх), производится обычным путем установки цементных мостов. Возможна также установка пакеров типа тампона-пробки для временной изоляции.

7. Для проведения откачек существенное значение имеет правильный подбор фильтра.

При откачках из одиночных скважин необходимо, чтобы фильтр имел минимальное входное сопротивление и не засорялся. Кроме того, фильтр должен быть прочным, иметь несложную конструкцию и по возможности легко извлекаться из скважины, чтобы можно было пользоваться им последовательно на нескольких скважинах.

Чаще всего для пробных и опытных откачек применяются дырчатые, проволочные, сетчатые и обсыпные (гравийные) фильтры различного вида, а в последнее время также некоторые новые их типы.

Наименьшее входное сопротивление имеют обсыпные фильтры (при правильном подборе обсыпки). Эти фильтры следует применять для мелкозернистых и тонкозернистых песков, в которых другие фильтры легко засоряются. Однако недостатком обсыпных фильтров является необходимость увеличения конечного диаметра скважин, так как толщина слоя обсыпки вокруг труб караса должна быть не менее 40—50 мм.

Проволочные фильтры также широко применяются и пригодны для песков различной крупности, исключая тонкозернистые. Эти фильтры прочны и легко могут быть изготовлены соответственно гранулометрическому составу пород (подбором необходимого шага намотки).

Сетчатые фильтры используются также широко, но следует предостеречь от установки фильтров с сеткой галунного плетения в мелко- и тонкозернистых песках, особенно в песках, содержащих глинистые и пылеватые частицы. В таких грунтах галунная сетка, особенно больших номеров с малым просветом водопроводящих отверстий, легко засоряется.

8. Для нормальной работы фильтра имеет большое значение соответствие размера водопроводящих отверстий или каналов гранулометрическому составу водоносной породы.

Через водопроводящие отверстия фильтра должно проходить следующее количество мелких частиц [2], %:

Гравийно и гравийно-галечные породы	20—30
Крупнозернистые пески	40—60
Мелко- и среднезернистые пески	60—80

Бóльшие величины относятся к разнозернистым грунтам, меньшие — к однородным по механическому составу.

По С. К. Абрамову [2], подбор фильтра рекомендуется производить, определяя по кривой гранулометрического состава расчетный диаметр частиц грунта d_p , соответствующий наиболее мелким частицам, не проходящим через фильтр, и рассчитывать размер водопроводящих отверстий по формуле

$$a = \beta d_p, \quad (8.1)$$

где β — коэффициент, учитывающий образование сводиков против отверстий, принимаемый равным для дырчатых фильтров с щелевыми отверстиями и сетчатых от 1 до 1,5; для дырчатых фильтров с круглыми отверстиями $\beta = 2 \div 3$; для проволочных фильтров 0,8—1,0 от ширины щелей между проволоками.

Меньшие величины соответствуют более однородным и мелкозернистым грунтам. Для сетчатых фильтров на основании величины a подбирается номер сетки.

Для обсыпных фильтров расчетный диаметр зерен грунта, по С. К. Абрамову, соответствует по кривой механического состава около 90% мелких частиц, а размер зерен обсыпки берется для опытных скважин в 6—10 раз большим расчетного.

Вторым условием нормальной работы фильтра является ограничение входной скорости фильтрации величиной предельно допустимой скорости фильтрации $u_{\text{доп}}$, рассчитываемой по эмпирической формуле С. К. Абрамова [2, 4]:

$$u_{\text{доп}} = 65 \sqrt[3]{k}, \quad (8.2)$$

где $u_{\text{доп}}$, k измеряются в метрах в сутки.

Формула (8.2) широко применяется, но является весьма ориентировочной, так как не имеет четкого теоретического обоснования, а получена в результате обобщения фактических данных преимущественно по эксплуатационным скважинам.

Следствием формулы (8.2) является зависимость для определения предельно допустимого дебита скважины $Q_{\text{пр}}$ (в кубических метрах в сутки), называемого также водозахватной способностью фильтра:

$$Q_{\text{пр}} = \pi d l u_{\text{доп}} = 204 d l \sqrt[3]{k}, \quad (8.3)$$

где d — внешний диаметр фильтра, м; l — длина рабочей (водоприемной) части фильтра, м.

Я. С. Суреньянец [146] и другие авторы рекомендуют определять предельную входную скорость по расчетному диаметру частиц породы. Последний для разнородных песков предлагается принять равным d_{50} , т. е. соответствующим 50% частиц кривой гранулометрического состава, для однородных песков — среднему диаметру частиц.

Конструкции опытных скважин бывают двух типов.

При ударно-канатном и колонковом бурении с промывкой водой или без промывки применяется обычная телескопическая конструкция с числом колонн обсадных труб, зависящим от глубины скважин и разреза проходимых пород.

Во вполне устойчивых породах фильтр не устанавливается; при наличии не вполне устойчивых участков ставится дырчатый или щелистый фильтр.

В рыхлых породах устанавливаются различные виды фильтров: в галечниках и песчано-галечных отложениях — дырчатые, щелистые и проволочные. Для грубозернистых песков целесообразно применять проволочные и сетчатые фильтры с сеткой квадратного плетения с размером ячеек 1—2 мм. Для мелко- и тонкодисперсных песков следует по возможности использовать обсыпные фильтры с щелистым, проволочным или сетчатым (с сеткой квадратного плетения) каркасом. Обсыпку рекомендуется применять однородную по гранулометрическому составу (просеянную через грохота) со средним диаметром зерен, в 4—6 раз

превышающим расчетный диаметр частиц породы, который рекомендуется считать для разнозернистых песков равным d_{50} .

Для обсыпных фильтров необходимо обеспечить центральное положение каркаса, при котором толщина слоя обсыпки везде одинакова; это достигается посредством устройства направляющих «фонарей» или других простых приспособлений.

Другой тип конструкции опытных скважин, такой же, как у глубоких скважин на нефть и газ, предусматривает бурение с глинистой промывкой, спуск колонны обсадных труб на всю глубину скважины, цементацию затрубного пространства и перфорацию (прострел) труб и цементной оболочки против горизонтов, предназначенных для исследования. Для сведения к минимуму степени несовершенства скважины по характеру вскрытия пласта количество отверстий перфорации должно быть значительным: примерно не менее 25—50 на 1 м. Перфорацию следует производить мощными пулевыми перфораторами АПХ-98, ПБ2-100 и др.; возможно также применение кумулятивных перфораторов: корпусных ПК и ПН диаметром 109, 105, 85 и 65 мм и бескорпусных ПКС и КНР. Торпедные перфораторы следует устанавливать только при наличии наблюдательных скважин, так как они вызывают значительное нарушение приствольной зоны, не поддающееся учету [83].

Иногда производят повторную дополнительную перфорацию, результатом которой может быть увеличение удельного дебита скважины; если же этого не происходит, то скважина считается совершенной по характеру вскрытия.

9. Откачки из шурфов производятся из водоносных горизонтов, залегающих на небольшой глубине. В рыхлых породах дно шурфов должно быть покрыто слоем фильтрующей обсыпки (в мелкозернистых песках двух- или трехслойной). В устойчивых породах стенки можно не крепить, что позволяет наблюдать за поступлением воды в шурф из отдельных прослоев, трещин и т. д. Шурфы можно проходить колодекопателями (КШК-25, КШК-30), выпускаемыми нашей промышленностью.

10. Сведения о насосах, применяемых для опытных работ, приведены в табл. 8.3. Подробно глубинные насосы описаны в книге Д. М. Хохловкина [154].

§ 8.4. Рекомендуемые схемы опытных гидрогеологических кустов

Наиболее распространенная схема расположения скважин опытного куста — двухлучевая, т. е. наблюдательные скважины располагаются по двум взаимно перпендикулярным лучам, на пересечении которых расположена опытная.

Увеличение числа лучей и наблюдательных скважин по сравнению с двухлучевой схемой целесообразно при неоднородных породах и неглубоком залегании водоносного горизонта, когда

Типы насосов	Условия применения	Марка насоса	Диаметр*, мм
Насосы, устанавливаемые на поверхности			
Центробежные	Для откачки при динамическом уровне на глубине не более 6—8 м от оси насоса и значительном дебите	Консольный заливной: 2 К-6	$\frac{50}{89}$
		3 К-9а	$\frac{80}{112}$
		6К-12	$\frac{150}{200}$
		Самовсасывающий С-204	$\frac{100}{150}$
Плунжерные и поршневые с механическим приводом	То же, но для откачек с меньшим дебитом. Для опытных нагнетаний	Горизонтальный поршневой: ПН-40	$\frac{25}{89}$
		ЗИФ Р-200/40	$\frac{50}{89}$
То же, ручные	Для опытных откачек из скважин не рекомендуются	РН, БКФ-2, БКФ	$\frac{25-38}{89}$
Диафрагмовые, «лягушка»	Для прокачки мелких скважин и кратковременных откачек из шурфов при слабом водопитоке	№ 1—4	$\frac{75-100}{89-125}$
Глубинные			
Штанговые (цилиндры) однодействующие	Для откачек при глубине динамического уровня не более 50—100 м и небольшом дебите	4" Бурвод III	$\frac{95}{112-150}$ $\frac{154}{200}$
То же, двойного действия	То же, но при большем дебите	ШНД и МНО ШНД-2	$\frac{100}{126}$ $\frac{145}{150-200}$

Таблица 8.3

сов, применяемых для опытных гидрогеологических работ [12, 145, 146, 154]

Производительность, $\frac{м^3/ч}{л/сек}$	Высота подъема, м	Характеристика работы	Примечания
илп в шурфе (шахте) у устья скважины			
$\frac{10-30}{3-8}$	24—34	Равномерная (при электроприводе). Надежно работают длительное время	Многоступенчатые насосы с высотой подъема 200 м и более применяются для подачи воды в напорные бассейны при опытных нагнетаниях [60]
$\frac{25-45}{7-12,5}$	20—25		
$\frac{110-200}{31-55,5}$	17—23		
$\frac{40-120}{11-133}$	15—20		
$\frac{0,9-2,4}{0,27-0,65}$	15	Легкая регулировка производительности в широких пределах	Насосы высокого давления применяются с целью подачи воды в напорные бассейны, а также для гидроразрыва
$\frac{11,5}{3,3}$	400		
$\frac{0,7-3,5}{0,2-1,0}$	30	Равномерность работы трудно обеспечить	
$\frac{18-24}{5-6,5}$	Незначительная	То же	Количество механических примесей может быть очень большим
насосы			
$\frac{3,6-5,8}{0,95-1,6}$	До 50	Колебания динамического уровня до 3—4 м.	В нефтяной промышленности применяются штанговые насосы с металлическими уплотняющими кольцами, дающие высоту подъема до 2000 м
$\frac{10,7}{3,0}$	50—100	Быстрый износ уплотняющих манжет или набивки, особенно при песковании скважин	
$\frac{13,2}{3,7}$	50—100	Колебания динамического уровня в несколько раз меньше, чем у однодействующих насосов	Конструкция и установка сложнее, чем у однодействующих
$\frac{8,9-22,5}{2,6-6,2}$	50—100		

Типы насосов	Условия применения	Марка насоса	Диаметр*, мм
Эрлифты	При различной глубине динамического уровня и большом дебите, а также для освоения скважин	2 ³ / ₄ "	$\frac{70}{150}$
		6"	$\frac{150}{200}$
		8"	$\frac{200}{250}$
Глубинные центробежные (артезианские) с двигателем на поверхности и ведущим вертикальным валом	Для длительных откачек (опытно-эксплуатационных) при отсутствии в воде грубого взвешенного материала	АТН-8"-1-22	$\frac{125}{200}$
		АТН-10"-1-13	$\frac{150}{250}$
Погружные электронасосы	Для откачек любой продолжительности при различной глубине динамического уровня; насосы большинства конструкций быстро изнашиваются при песковании скважины	ЭЦВ4-4-70	$\frac{95}{112}$
		ЭЦВ6-16-75	$\frac{142}{150}$
		8АПВМ-10-7	$\frac{185}{200}$
		ЭН-40-700	$\frac{109}{125}$
Винтовые артезианские (ВАН)	При небольшом водопритоке, допустимо наличие взвешенного материала	ВАН-4"	$\frac{90}{125}$
Водоструйные	То же, применяется для освоения пескующих скважин небольшой глубины и производительности	ВН-ВЦ-6"	$\frac{100}{150}$

* В числителе — диаметр глубинных насосов; в знаменателе — диаметр скважины на устьях

бурение и оборудование наблюдательных скважин не требуют продолжительного времени и значительных затрат.

Рекомендуемые расстояния между опытной и наблюдательными скважинами указаны в табл. 8.4. Они ориентировочны, но составляют примерно геометрическую прогрессию, что соответствует логарифмической форме депрессионной кривой (предложено впервые в 1940 г. С. А. Кодем [77]).

Производительность, $\frac{м^3}{ч}$ $\frac{л}{сек}$	Высота подъема, м	Характеристика работы	Примечания
$\frac{20-25}{5,5-7,0}$ $\frac{70-100}{19,5-28}$ $\frac{100-150}{28-42}$	100 и более	Надежно работают длительное время. Не чувствительны к взвешенному материалу. Глубина погружения форсунки не менее 0,3—0,5 высоты подъема	Производительность указана при расположении воздушных труб внутри водоподъемных. Существуют конструкции, позволяющие уменьшить глубину погружения: динамоэрлифты (принцип конической насадки) и вакуумэрлифты
$\frac{30}{8,3}$ $\frac{70}{20,6}$	94 100	Для кратковременных откачек не применяются вследствие сложности установки	Существуют конструкции для скважин большого диаметра с производительностью, значительно больше указанной
$\frac{4}{1,1}$ $\frac{16}{4,5}$ $\frac{15-30}{4,4-8,8}$ $\frac{1,7}{0,47}$	70 75 120—75 720	Современные конструкции пригодны для длительной бесперебойной работы	Конструкции погружных насосов совершенствуются, и применение их становится все более широким и разнообразным
$\frac{5}{1,4}$	15	—	—
$\frac{14,4-12,2}{4,0-3,4}$	15—20	Работают на оборотной воде	—

стык установки насосных труб или глубинных насосов.

При установлении расстояния до наблюдательных скважин от центральной следует большие расстояния принимать для трещиноватых или закарстованных пород и напорных вод при длительных откачках. Меньшие расстояния соответствуют пористым породам, безнапорным водам и более кратковременным откачкам.

Конструкция опытной (центральной) скважины опытного куста такая же, как при откачке из одиночных скважин, но при

Таблица 8.4

Рекомендуемые расстояния между опытной
и наблюдательными скважинами, м

Номер наблюдательной скважины на луче	Проницаемость пород		
	Небольшая	Средняя	Высокая
1	1—3	3—5	5—10
2	3—10	10—15	15—30
3	10—30	30—50	50—100
4	—	100—150	150—300

исследовании водообильных горизонтов дебит опытной скважины должен быть при одинаковых условиях большим, чем для откачек из одиночных скважин, чтобы в наблюдательных скважинах понижения уровня были достаточно большими для возможности их точного измерения. Поэтому может возникнуть необходимость увеличить диаметр центральной скважины, а иногда принять другие меры. Так, например, откачка из закарстованных пород, покрывающих соляную залежь Индерского месторождения, производилась из трех находящихся рядом центральных скважин насосами, установленными в шахте. Расход при откачке достигал 228 м³/ч, а коэффициент водопроницаемости нижней части закарстованного горизонта — 780—1100 м/сутки [122].

Оборудование наблюдательных скважин опытного куста должно удовлетворять следующим требованиям:

1) исследуемый горизонт тщательно изолируется для устранения возможности проникновения воды из вышележащих водоносных горизонтов и с поверхности. Выполнение этого требования весьма существенно, так как небольшой приток посторонней воды может сильно влиять на положение уровня;

2) скважины в неустойчивых породах оборудуются фильтрами такого же типа, что и для центральной скважины, но меньшего диаметра и обычно небольшой длины (2—3 м).

При проведении длительных откачек рекомендуется иметь за пределами заметного их влияния режимную скважину. Наблюдения над колебаниями уровня в этой скважине в период откачки позволяют ввести поправки в данные измерений динамического уровня в наблюдательных, а иногда и в центральной скважинах.

В книге Б. В. Боровского и других [21] даны близкие к изложенному, но более подробные указания, относящиеся к наблюдательным скважинам.

§ 8.5. Подготовка буровых скважин к опытным гидрогеологическим работам

Для получения удовлетворительных результатов опытных гидрогеологических работ большое значение имеет подготовка скважины или, по терминологии, нефтяников, ее освоение. Это

понятие шире, чем применяемое обычно гидрогеологами «предварительная прокачка», так как освоение скважин заключается не только в прокачке, но и в других мероприятиях.

В период освоения скважины в породах, непосредственно примыкающих к водоприемной ее части, происходит интенсивная суффозия и из них выносятся мелкие частицы, поступившие из бурового шлама, глинистого раствора, а также содержащиеся в породе. При удовлетворительном освоении скважин проницаемость пород в зоне, примыкающей к водоприемной части, должна быть такой же, как у ненарушенных пород.

Для того чтобы достигнуть быстрого и удовлетворительного освоения скважин, необходимо создавать в приствольной зоне высокие градиенты и скорости фильтрации, что достигается откачкой при наибольшем возможном понижении уровня, при слабом притоке воды — тартажем (желательно до забоя) и свабированием. Откачку следует вести неравномерно с перерывами. Освоение скважин в мелкозернистых и тонкозернистых рыхлых, а также в цементированных пористых или тонкотрещиноватых породах может быть сопряжено с затруднениями, особенно если бурение велось с глинистой промывкой. В подобных условиях рекомендуется чередовать интенсивную откачку с промывкой скважины, если это не дает положительных результатов, — с кратковременными наливками и нагнетаниями.

Подготовку скважин рекомендуется производить «до полного осветления воды». Однако это требование не всегда выполнимо. Так, например, при откачках из четвертичных образований в районах развития болот опалесцирующая муть может наблюдаться в откачиваемой воде в течение многих суток, причем содержание взвешенных частиц может достигать нескольких десятков миллиграммов на литр, но вследствие очень большой дисперсности взвешенного материала наличие его в данном случае не является признаком интенсивных суффозионных процессов, приводящих к сколько-нибудь заметным изменениям проницаемости пород во время откачки.

Бурить неглубокие скважины с глинистой промывкой в слоистых песках и песчано-галечных отложениях не следует, так как полной деглинзации таких скважин часто достигнуть не удастся. Полное осветление воды не является еще признаком достаточной деглинзации, так как чистая вода при откачке в данном случае обычно поступает из слоев с более высокой проницаемостью пород, более легко промываемых. Пример неудавшейся деглинзации аллювия и пролювия в неглубоких скважинах в предгорьях Алтая был приведен выше (см. гл. 2).

Освоение поглощающих скважин должно производиться особенно тщательно. В конце периода освоения содержание взвешенных частиц в откачиваемой воде должно быть для мелкопористых или тонкотрещиноватых пород не более 3—10 мг/л, что точнее устанавливается опытным путем.

Подробные данные о методах освоения глубоких скважин, иллюстрированные рядом примеров, приведены в книгах Г. Т. Овнатовна [109, 110], а также Ф. С. Абдулина и И. М. Муравьева [1].

Скважины, предназначенные для опытных нагнетаний при исследованиях для гидротехнического строительства, перед опитами должны энергично промываться и, если возможно, прокачиваться (в водоносной зоне). Промывку следует производить, как правило, после спуска тампонирующего прибора, но до закрепления колец или других уплотняющих приспособлений.

Наблюдательные скважины опытных гидрогеологических курсов и предназначенные для стационарных наблюдений должны подготавливаться теми же методами. Неподготовленные наблюдательные скважины вследствие наличия в заполняющей их водотонких взвешенных частиц и особенно коллоидов нередко не «реагируют», т. е. уровень воды в них не соответствует уровню подземных вод. Поэтому обязательна проверка «реагирования» наблюдательных скважин, производимая путем отбора (оттартывания и т. п.) из них воды и наблюдения над восстановлением уровня, которое должно происходить быстро и полностью до статического уровня. При закольматированных породах восстановление уровня происходит замедленно и может прекратиться, не достигнув статического уровня, что можно установить посредством налива небольшого количества чистой воды. Восстановившийся уровень после отбора и налива воды должен быть одинаковым; если же они не совпадают, то скважина реагирует неудовлетворительно и должна вновь промываться и прокачиваться.

Скважины для поинтервальных нагнетаний и откачек в скальных породах при изоляции опробуемых интервалов тампонирующими устройствами со сжимаемыми резиновыми кольцами не следует бурить дробью, так как при этом обычно поверхность стенок скважины получается неровной, часто со спиральными выемками, что затрудняет надежную установку тампонов.

В настоящее время поинтервальные опытные нагнетания и откачки при исследованиях для плотин на скальном основании преимущественно производятся в процессе бурения при постоянной длине интервала. Интервал изолируется только сверху одинарным тампоном, а нижней границей интервала является забой скважины. Такая схема проведения опытов наиболее надежна; кроме того, одинарный тампон со сжимаемыми резиновыми кольцами дает возможность производить откачку. Однако данный способ проведения опытов является трудоемким и длительным, так как при каждом опыте необходимо прекращать бурение, спускать, а затем поднимать тампонирующее устройство.

Автор считает, что для устойчивых пород средней проницаемости можно производить нагнетания (хотя бы для части опытных скважин) после окончания бурения, изолируя исследуемые интервалы двойным тампоном. Такой значительно менее трудоемкий

метод применялся при исследованиях для высоких плотин на р. Сулак [60] и на р. Рион у с. Намохвани и дал удовлетворительные результаты, очень близкие к полученным по предыдущей схеме.

Проведение нагнетаний в скважине, пробуренной при интервалах переменной длины, изолируемых сверху одинарными тампонами, вообще нельзя рекомендовать, так как значения удельного водопоглощения получаются не вполне сравнимыми друг с другом. Однако для слабопроницаемых и особенно слоистых пород этот простой метод может применяться, поскольку неточность получаемых данных в этих условиях не имеет практического значения. Описания различных тампонирующих устройств и способов пользования ими имеются в инструкции Гидропроекта [55].

После окончания опытных гидрогеологических работ все опытные и наблюдательные скважины, исключая оставляемые для стационарных наблюдений пад режимом подземных вод, должны быть подвергнуты ликвидационному тампонированию. Это особенно существенно для скважин, пробуренных на участках строительства плотин и на шахтных или карьерных полях.

Ликвидационное тампонирование производится путем заливки скважин густым глинистым раствором, утяжеленным при наличии самоизливающихся горизонтов с высоким напором. Применяется также заливка скважин цементным раствором и выдавливание плотной глины из колонковой трубы.

Могут быть целесообразными и комбинированные способы тампонирования скважины, например заливка ее глинистым раствором с установкой цементных пробок против водоносных горизонтов.

Г Л А В А 9

ПРОИЗВОДСТВО ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ И ИХ ДОКУМЕНТАЦИЯ

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОПЫТНЫМ РАБОТАМ

§ 9.1. Число и величина понижений (повышений) напора для различных видов опытных работ. Продолжительность опытов

Откачки из одиночных скважин производятся обычно при двух или трех понижениях (режимах) уровня. Однако это требование нельзя считать обязательным, и в ряде случаев можно ограничиться проведением пробной откачки при одном режиме. Это возможно, если все измерения проводятся точно, скважина хорошо подготовлена, откачка ведется равномерно, установлено отсутствие отклонения от закона Дарси, а также надежно определен

статический уровень. Соответствующие данные достаточны для определения коэффициента фильтрации, удельного дебита параметров, получаемых по данным наблюдений над восстановлением уровня после окончания откачки. Необходимость проведения откачек при двух или трех понижениях уровня вызвана в большинстве случаев невыполнением указанных условий, а также искажающими факторами (см. § 9.2).

Однако задачи откачки могут быть более сложными, например при необходимости определения фильтрационных параметров, характеризующих отклонения от закона Дарси, требуется проведение откачки с более чем тремя понижениями уровня (см. § 6.4). В подобных случаях максимальный дебит обычно соответствует наибольшей производительности насоса, но не должен превышать предельной производительности скважины.

Если скважина подготовлена хорошо, то последовательность режимов откачки не имеет значения. В случае же сомнений в достаточной продолжительности и интенсивности предварительной прокачки лучше откачку начинать с максимального понижения. Откачку можно прекращать в конце периода, когда дебит и уровень в опытной скважине плавно изменяются в течение нескольких часов при пробных откачках и в течение 8—24 ч при опытных.

Регулировать откачку рекомендуется при достижении постоянного дебита (расчетные формулы неустановившегося движения при постоянном дебите проще и точней, чем при других условиях, например при постоянном динамическом уровне). При этом динамический уровень плавно и замедленно понижается. Если дебит все же колеблется из-за неравномерной работы насоса (обычно это имеет место при приводе насоса от двигателя внутреннего сгорания), то для определения момента прекращения откачки следует следить за «мгновенным» удельным дебитом, который повторяет колебания дебита и динамического уровня в сглаженном виде.

При пробной откачке дебит измеряется через интервалы времени от 5 до 15, иногда 30 мин в зависимости от равномерности хода откачки.

Дебит измеряется объемным способом или посредством различных приборов (расходомеров) и устройств. При длительных откачках и закачках применяется непрерывная регистрация дебита самописцами [12, 117]. Объемный способ рекомендуется при расходе не более 10 л/сек; время наполнения мерного сосуда должно быть не менее 30—40 сек.

Основные данные о приборах и устройствах для измерения и регистрации дебита приведены в табл. 9.1.

Динамический уровень (а при самоизливе давление на устье) рекомендуется измерять через каждые 2—10 мин, причем в начале опыта, когда режим откачки явно неустановившийся, измерения ведутся чаще.

Динамический уровень измеряется электроуровнемерами или пневматическим измерителем [145]. Применение простейших приспособлений (хлопушек и т. п.) преимущественно в наблюдательных скважинах допустимо только при глубине уровня не более 20—30 м. Уровень в глубоких скважинах измеряется аппаратом Яковлева, используется также эхолот [145]. При длительных откачках целесообразно применение самописцев поплавкового или другого типа [117, 145, 158].

Давление на устье при самоизливе и закачке измеряется точными образцовыми манометрами, применяются также самописцы [117, 158].

Переходить с одного режима на другой лучше без остановки скважины. Если же остановка необходима по техническим причинам, то рекомендуется в соответствующее время вести измерения восстанавливающегося уровня или давления на устье, делая замеры вначале через промежутки времени 1—2 мин, затем через 5, 10, 15 и т. д.

После прекращения откачки наблюдения над восстановлением уровня или давления производятся в том же порядке, причем следует по возможности дожидаться полного восстановления и определить статический уровень. Вообще статический уровень следует измерять дважды — до начала откачки и после ее окончания. Несовпадение результатов может быть вызвано ошибками измерений, режимными колебаниями, а также неудовлетворительной подготовкой скважин. Для контроля над ходом откачки и лучшей регулировки ее следует немедленно на месте работы строить хронологический график с нанесением линий, соответствующих дебиту, понижению уровня и «мгновенному» удельному дебиту; для безнапорных вод рекомендуется наносить на график вместо удельного дебита величину $Q/S_c (2H - S_c)$.

После окончания откачки при каждом режиме следует нанести дебит и понижения (средние для времени относительной стабилизации откачки) на график зависимости этих величин друг от друга, т. е. строить кривую дебита (индикаторную линию, по терминологии нефтяников); для безнапорных вод аналогично строится график зависимости между дебитом и величиной $S_c (2H - S_c)$. Оба графика при линейном законе фильтрации представляют собой прямые линии (рис. 9.1).

При нормальном ходе откачки, отсутствии искажающих факторов и ошибок измерений указанные графики должны иметь плавный характер. Если же обнаруживаются значительные отклонения отдельных точек их от плавной линии, то следует по возможности выяснить их причины и повторить откачку при соответствующем режиме. Причинами указанных отклонений могут быть (кроме ошибок измерения): засорение фильтра (удельный дебит падает); промыв трещин и водопроводящих каналов (удельный дебит быстро повышается); прорыв воды из других горизонтов (удельный дебит резко повышается и могут измениться

Тип и марка или вид прибора	Назначение и условия применения	Калибр, мм	Дебит, :
			мин.
Ротаметр стеклянный РС2-1,6Ж	Измерение небольших дебитов при опытных работах	32	0,08
		40	0,12
		40	0,23
Водомеры-счетчики: ВКМ-10 СХВК-1,6 СХВК-4 ВВ-50 ВВ-80 ВВ-100 ВВ-150	Измерение объема протекшей воды при откачках, нагнетаниях и наливах	40	1,5
		30	0,1
		32	0,25
		50	1,4
		80	2,0
		100	3,0
Водосливы: треугольный и прямоугольный трапециевидный	Измерение значительных дебитов, в частности при групповых откачках	—	До 200 и 6
Диафрагмовые расходомеры с концевой диафрагмой	Измерение расходов в широком диапазоне	$D/d = 53/26 \div 252/210$	2,0
Самопишущие диафрагмовые расходомеры ДП и ДН	При опытных и опытно-эксплуатационных откачках с различным дебитом	$D/d = 1,25 \div 5$	Шир диап
Прибор ГП-40	При опытных и опытно-эксплуатационных откачках для записи расхода на диаграммной ленте	—	Незначительный
Индукционные (электромагнитные) расходомеры 4РИ	Непрерывное измерение, регистрация и суммирование расхода	10—200	0,4
Скважинные расходомеры: ДАУ-3 ТСР-34 ТСР-70	Расходомерия	73	0,05
		34	0,04
		70	0,25

Таблица 9.1

устройств для измерения и регистрации дебита скважин [12, 117, 145, 165]

Точность, %	Принцип действия	Примечание
±1,5 ±1,5 ±1,5	Расход определяется по перемещению поплавка в восходящем водном потоке	Требуется точная вертикальная установка
±2 2 2 2 2 2	Механизм для отсчета объема протекшей воды приводится в действие вертушкой (спиральной или шнековой) или крыльчаткой	Вертушки быстро изнашиваются при наличии в воде механических примесей
3—5 7—10		Необходима тщательная установка рамки и выравнивание дна и откосов потока в верхнем бьефе [145]
±4—5	Измерение перепада давления, создаваемого диафрагмой, и расчет расхода	Измеряемый расход определяется как функция отношения D/d (D —диаметр сливной трубы; d —диаметр диафрагмы) [12, табл. 22]
±2—5	Запись кривой перепада давления, вызываемого диафрагмой, и последующий расчет расхода	Расход определяется так же, как у диафрагмовых расходомеров с концевой диафрагмой. При регистрации высоких расходов диафрагма устанавливается на отводе
±2,5	Расход воды, проходящей через бак, соответствует разности уровней в двух камерах его, разделенных дырчатой перегородкой	Прибор может служить также для регистрации и записи понижения уровня (до 20 м) при откачке. Существует несколько других дебитографов такого же типа
±1,5	Скорость движения воды в трубопроводе определяется величиной э. д. с., возникающей при движении потока в магнитном поле	Достоинство прибора—отсутствие движущихся и изнашивающихся частей. Существует несколько видов прибора, в том числе самошсы
±6 ±3—10 ±3—10	Расход воды в скважине на различной глубине определяется гидрометрической вертушкой	Кроме вертушек в других приборах данного типа применяются датчики иного вида

химический состав и температура воды, а также появиться в большом количестве взвешенные частицы); заполнение частично или полностью водоприемной части скважины рыхлым материалом, вынесенным из пород или образовавшимся за счет обвалов стенок скважины (дебит резко падает). При резком уменьшении дебита следует проверить положение «забоя» и при необходимости нижней части скважины промыть ее или прочистить.

Наблюдения и измерения при проведении кустовых откачек для центральной скважины такие же, как и при откачках из од-

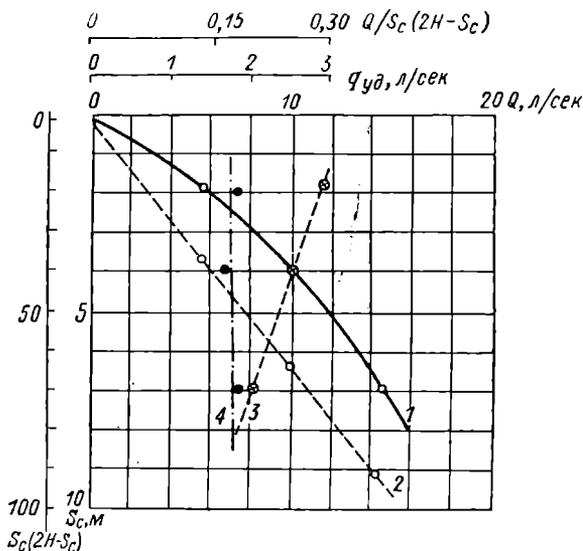


Рис. 9.1
Графики зависимости $Q = f(S_c)$ (1) и $Q = F [S_c \times (2H - S_c)]$ (2), $q_{уд}$ (3) и $Q/S_c (2H - S_c)$ (4) [59].

ночных скважин, но дополнительно систематически измеряются уровни в наблюдательных скважинах, частота которых может быть меньшей, чем для опытной скважины, в 2—3, а для отдаленных наблюдательных скважин в 5—6 раз, поскольку в них уровень изменяется значительно медленней, чем в опытной.

Понижения уровня в наблюдательных скважинах наносятся на хронологический график; на него наносится также уровень воды в режимной скважине, если она имеется.

График зависимости между дебитом и понижением уровня [или величиной $S_c (2H - S_c)$ для безнапорных вод] при кустовых откачках строится не только для опытной, но также и для наблюдательных скважин (рис. 9.2).

По прежним представлениям кустовую откачку следует заканчивать только после стабилизации уровней как в центральной, так и во всех наблюдательных скважинах (если пренебречь ре-

жимными колебаниями уровня). В настоящее время это требование вообще не является обязательным, но если учесть, что затраты на бурение скважин и оборудование опытного куста значительно больше эксплуатационных расходов при проведении откачки (особенно при значительной глубине скважин), можно заключить, что доведение опытной кустовой откачки до стабилизации уровней в наблюдательных скважинах почти всегда целесообразно. Это подчеркивается тем, что в ответственных случаях

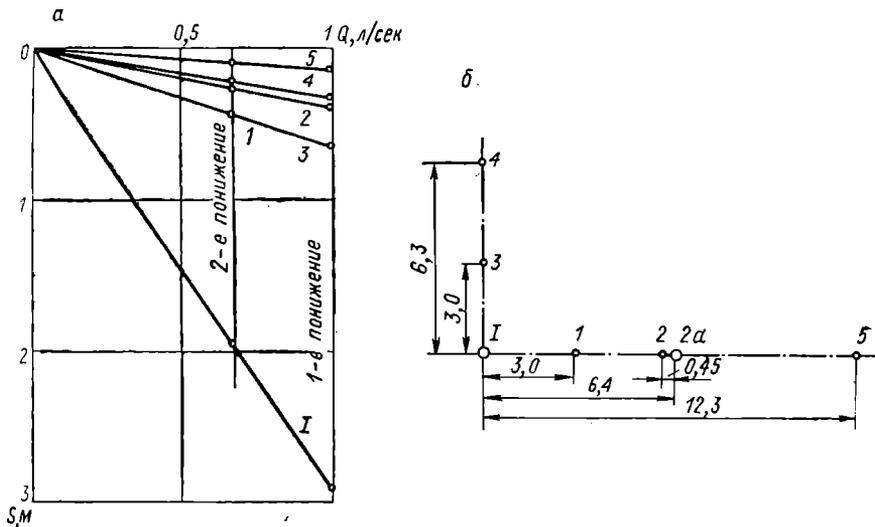


Рис. 9.2
График зависимости между дебитом и понижением напора в центральной (I) и наблюдательных (1—5) скважинах при кустовой откачке (а) и план расположения скважин (б).

расчеты по зависимостям установившегося движения будут контрольными и могут также служить для уточнения соответствующих параметров.

Длительные опытно-эксплуатационные откачки, а также нагнетания проводятся обычно при одном режиме, но желательно, чтобы им предшествовала пробная откачка при двух-трех различных режимах. Продолжительность этих работ разнообразна и может определяться не только стабилизацией дебита и динамического уровня (или давления на устье), но также установлением постоянного химического состава воды, содержания в ней взвешенных частиц и т. п., а также состоянием фильтра, насоса и другого оборудования.

Длительная откачка или закачка прекращаются после того, как вполне устойчивая работа скважины наблюдается в течение 10—20 суток, а иногда месяца и более.

Суммарные нагнетания и наливы для одиночных скважин и кустовые производятся так же, как откачки. Но режим этих опытов может быть менее устойчивым, а продолжительность большей, чем откачек, вследствие кольтации пород в приствольной зоне опытной скважины, ведущей к снижению дебита и необходимости промывки или прокачки скважин.

Коэффициент действительной скорости движения подземных вод k_d при откачке или нагнетании определяется следующим образом.

При откачке индикатор вводится в наблюдательную скважину, обычно близкую к опытной (время прохождения индикатора предварительно приближенно рассчитывается). Это делается в период устойчивого режима откачки и желательно при максимальном дебите. Индикатор вводится с помощью специальной желонки или в ампуле, спускаемой на глубину исследуемого горизонта и в нужный момент разбиваемой.

Если есть основание предполагать анизотропность пласта в горизонтальной плоскости, индикатор следует ввести последовательно в наблюдательные скважины, расположенные на различных лучах.

Концентрация индикатора определяется в пробах откачиваемой воды, отбор которых начинается несколько ранее ожидаемого времени появления индикатора в опытной скважине и заканчивается после того, как содержание его вновь приблизится к нулю или естественному фону (если индикатор или его составные части содержатся в подземной воде). Интервалы между взятием проб обычно от 10 мин до 1 ч в зависимости от метода определения концентрации и особенностей водоносного горизонта.

Методы определения концентрации индикатора в пробах преимущественно следующие: визуальный для красящих веществ (для флюоресцеина, уранина и т. п. применяется флюороскоп); химический; на основании электропроводности (с помощью резистивметра для растворов NaCl и NH_4Cl); спектральный (для солей лития и стронция); радиоактивные (для радиоизотопов).

Вводить индикатор в опытную скважину при нагнетании или наливе лучше всего с помощью простого устройства типа дозатора, присоединяемого к трубе, подводящей воду к оголовку тампона или скважины [64].

Преимуществом определения действительной скорости в процессе нагнетания является то, что индикатор после введения его в опытную скважину может быть обнаружен в нескольких наблюдательных скважинах. Кроме того, при нагнетании движение индикатора и рассеяние его описываются более простыми зависимостями.

Количество различных индикаторов, обеспечивающее успешное проведение опытов, установлено только для линейного потока. Решение этой задачи для условий ввода индикатора в опытную скважину при нагнетании связано с существенными затруд-

нениями, так как зависимости концентрации индикатора от расстояния в радиальном потоке подземных вод сложны и неточны (см. § 6.1).

Не используя непосредственно теоретических решений, автор получил элементарным путем простую, но ориентировочную зависимость для определения требуемых количеств различных индикаторов в радиальном потоке:

$$g = ag_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \frac{m}{m_0} \cdot \frac{Q_0}{Q}, \quad (9.1)$$

где g_0 , r_0 , m_0 и Q_0 соответственно количество индикатора; расстояние до наблюдательной скважины от опытной, пустотность и расход воды, приходящийся на единицу мощности пласта или проницаемой зоны при опыте, произведенном в стандартных условиях; g , r , m и Q — те же величины для намеченного опыта; a — безразмерный коэффициент, учитывающий структуру проводящих воду каналов и способность пород сорбировать индикатор ($a \geq 1$).

Для опыта, проводимого в стандартных условиях, было принято $r_0 = 5$ м, $m = 0,02$ (для трещиноватой породы), $Q_0 = 50$ м³/сутки и следующее количество различных индикаторов g_0 , г: флюоресцин, флюорантрон, уранин — 20—50, конго красное и другие анилиновые краски — 200—500, поваренная соль, нашатырь — 2000—5000, хлористый литий (при определении концентрации спектральным анализом) — 50—100.

Формула (9.1) не противоречит дифференциальному уравнению конвективной диффузии в радиальном потоке (6.4), а количество индикаторов для стандартного опыта, указанное выше, отражает существующую практику и включает некоторый «запас». Основные затруднения при расчетах по формуле (9.1) связаны с определением коэффициента a , для установления которого в разных условиях необходимы экспериментальные работы.

Поинтервальные нагнетания в нашей практике проводятся при двух или трех различных давлениях. Максимальное давление при опытах $p_{\text{макс}}$ должно быть меньше давления, вызывающего нарушение пород вследствие гидроразрыва, т. е. $p_{\text{макс}} < \Delta gh$, где Δ — плотность (для скальных пород обычно Δ равно 2,4—2,6 кг/см³), h — глубина верха интервала от поверхности. Кроме того, давления и соответствующие им расходы воды при всех ступенях должны иметь величину, позволяющую надежно их измерять. Формальные требования, имеющиеся в некоторых ведомственных инструкциях и старых руководствах, относительно установления максимальных давлений в зависимости от подпора, создаваемого плотиной, слабо обоснованы и выполнять их не обязательно.

Продолжительность поинтервальных нагнетаний при исправности всей аппаратуры и равномерном ходе опыта может быть очень небольшой, нагнетания можно заканчивать при постоянстве

расхода и давления в течение $1/2-1$ ч для каждой ступени давления, так как практически установившееся движение в трещиноватых породах наступает весьма быстро. Отсчеты расхода и давления при поинтервальных нагнетаниях следует проводить через каждые 5—10 мин.

В зарубежной практике поинтервальные нагнетания проводятся обычно согласно нормам М. Люжона [95] при одной ступени давления 10 кгс/см^2 и продолжительности опыта 10 мин.

В настоящее время в Гидропроекте признано желательным производить поинтервальные нагнетания по схеме Люжона, что дает значительную экономию времени и средств. Надежность получаемых данных проверена опытным путем.

Автор считает, что сокращение продолжительности опыта допустимо при удовлетворительном его проведении, так как следствием его должно быть увеличение удельного водопоглощения не более чем на 10—15%, что при ориентировочности этого параметра не имеет значения.

Определение коэффициента связи со смежными горизонтами не требует особых приемов. Существенно только точно измерять уровни воды в наблюдательных скважинах, поскольку понижения его могут быть незначительными.

Откачки — нагнетания характеризуются быстрой стабилизацией дебита и динамического уровня в опытной скважине, что позволяет при бесперебойном ходе опыта и исправности всей аппаратуры сократить его продолжительность примерно до одной смены на каждую ступень. Увеличение продолжительности опыта может потребоваться в случае кольматации пород в поглощающей скважине, так как давление, при котором можно в нее закачать всю воду, поступающую из опытной скважины, может настолько возрасти, что окажется необходимой промывка этой скважины или, что более эффективно, перемена ее местами с опытной.

Частота измерений дебита и уровня при опытах откачки — нагнетания такая же, как при обычных пробных откачках.

§ 9.2. Документация опытных гидрогеологических работ

Первичная документация опытных гидрогеологических работ заключается в записях в журнале всех данных измерений и наблюдений, производимых при опыте, а также, как было указано, составлении на месте работы основных графиков, характеризующих ход опыта (в черновом виде). В журнале должны быть также приведены точные сведения о всех неполадках, перерывах, неисправности оборудования и аппаратуры, влияющих на получаемые данные.

Первичные записи ведутся дежурным наблюдателем или техником и регулярно просматриваются и исправляются опытным гидрогеологом, ответственным за результаты опыта.

Следующей стадией документации является проверка и оформление всего первичного материала, составление дополнительных графиков и расчеты фильтрационных параметров. Эта работа выполняется на базе партии (отряда) опытными специалистами и должна быть закончена до начала демонтажа оборудования опытной и наблюдательных скважин, для того чтобы в случае обнаружения дефектов можно было повторить соответствующую часть опыта. Расчеты параметров повторяются и дополняются при камеральной обработке материалов в организации, производящей работы.

Форма документации опытных гидрогеологических работ имеется в большинстве проектно-изыскательских организаций и опубликована в различных руководствах и инструкциях [55].

В камеральный период дополнительно составляются следующие графические материалы.

I. Для одиночных скважин:

1) графики восстановления уровня или давления на устье в координатах Δh и $\lg t$ или $\lg [t/(t - t_0)]$ (см. § 4.5). Если откачка в начальный период проводилась равномерно при постоянном дебите, то также составляется аналогичный график для этого периода;

2) при возможности отклонения от закона Дарси — график зависимости между дебитом и понижением уровня (давления) в координатах $\lg Q$ и $\lg S_c$ или $\lg [S_c (2H - S_c)]$ для безнапорных вод (рис. 6.1);

3) для скважин, исследованных методом поинтервальных нагнетаний или откачек, кроме того, эпюры удельного водопоглощения, которые рекомендуется давать на одном чертеже с данными других исследований скважины, в том числе с результатами каротажа и расходомерии. Несколько сокращенный образец такого комплексного графика, составленного во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ) М. С. Кравец и О. К. Воронковым при участии автора в 1969 г., изображен на рис. 9.3.

При исследованиях для гидротехнического строительства составляются также графики рассеяния удельных водопоглощений с нанесением на ось абсцисс логарифма удельного водопоглощения и на ось ординат глубины от поверхности или высотной отметки (рис. 9.4).

II. По данным кустовых откачек или нагнетаний:

1) геолого-литологические разрезы по лучам опытного куста со схематическим показом конструкции скважин (основных технических данных), депрессионных линий при всех режимах и статического уровня. Для лучей, имеющих более двух наблюдательных скважин, составляются также графики депрессионной линии с логарифмическим масштабом расстояний наблюдательных скважин от центральной, по методу С. А. Коля (см. § 4.4);

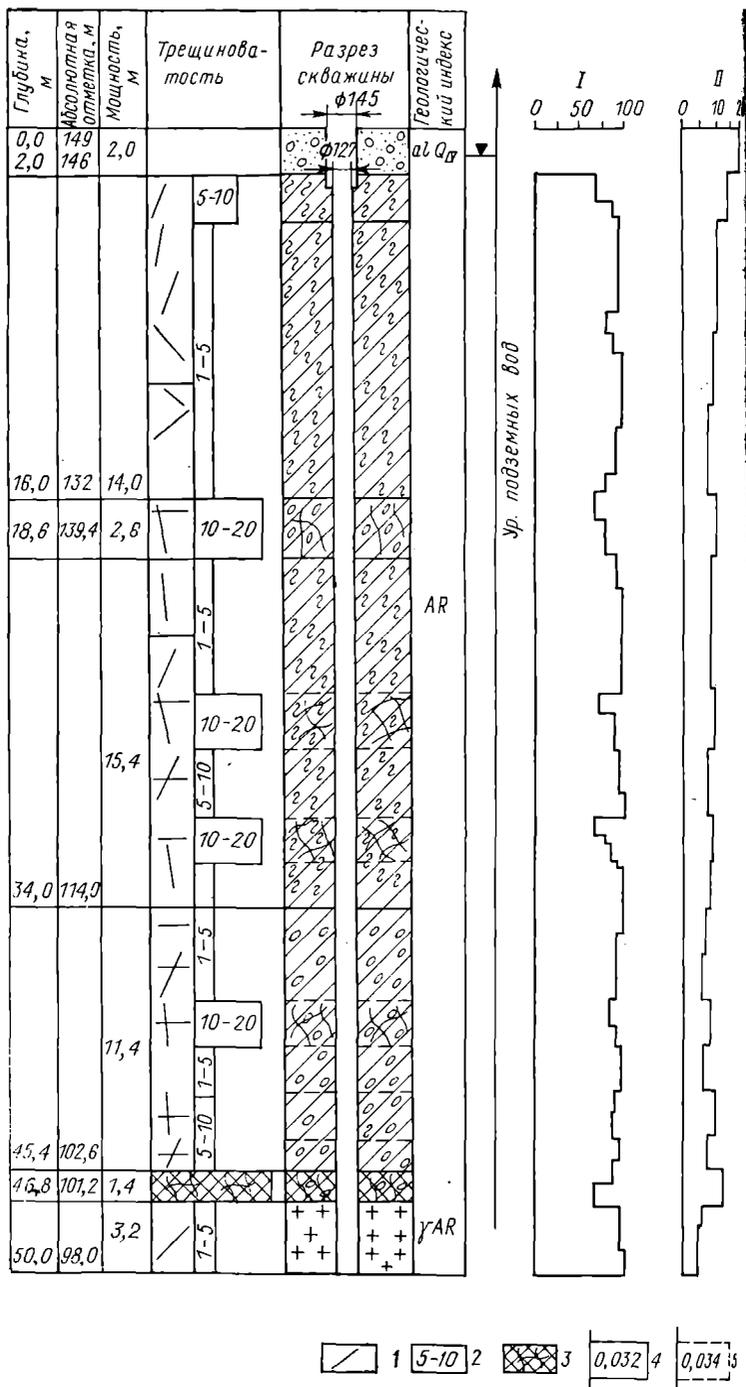
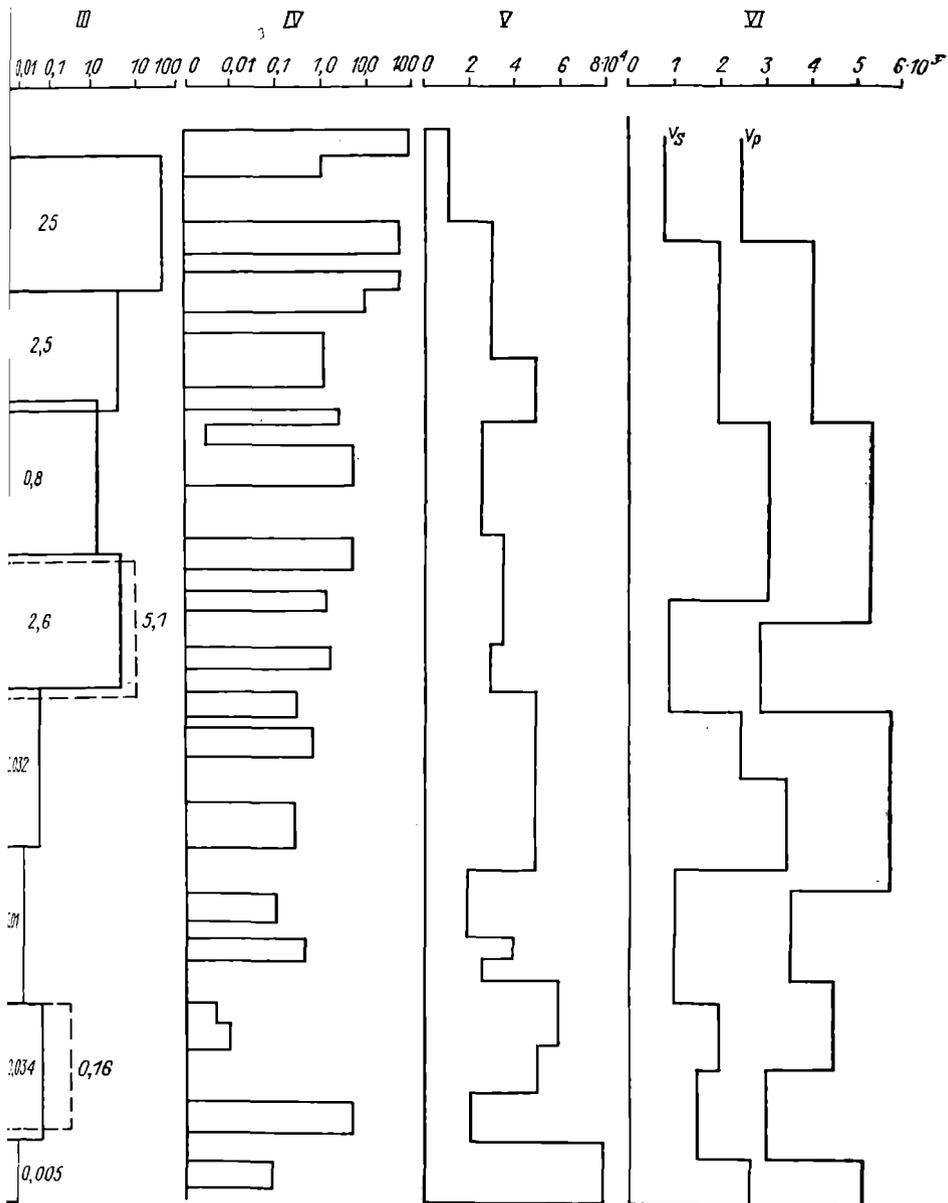
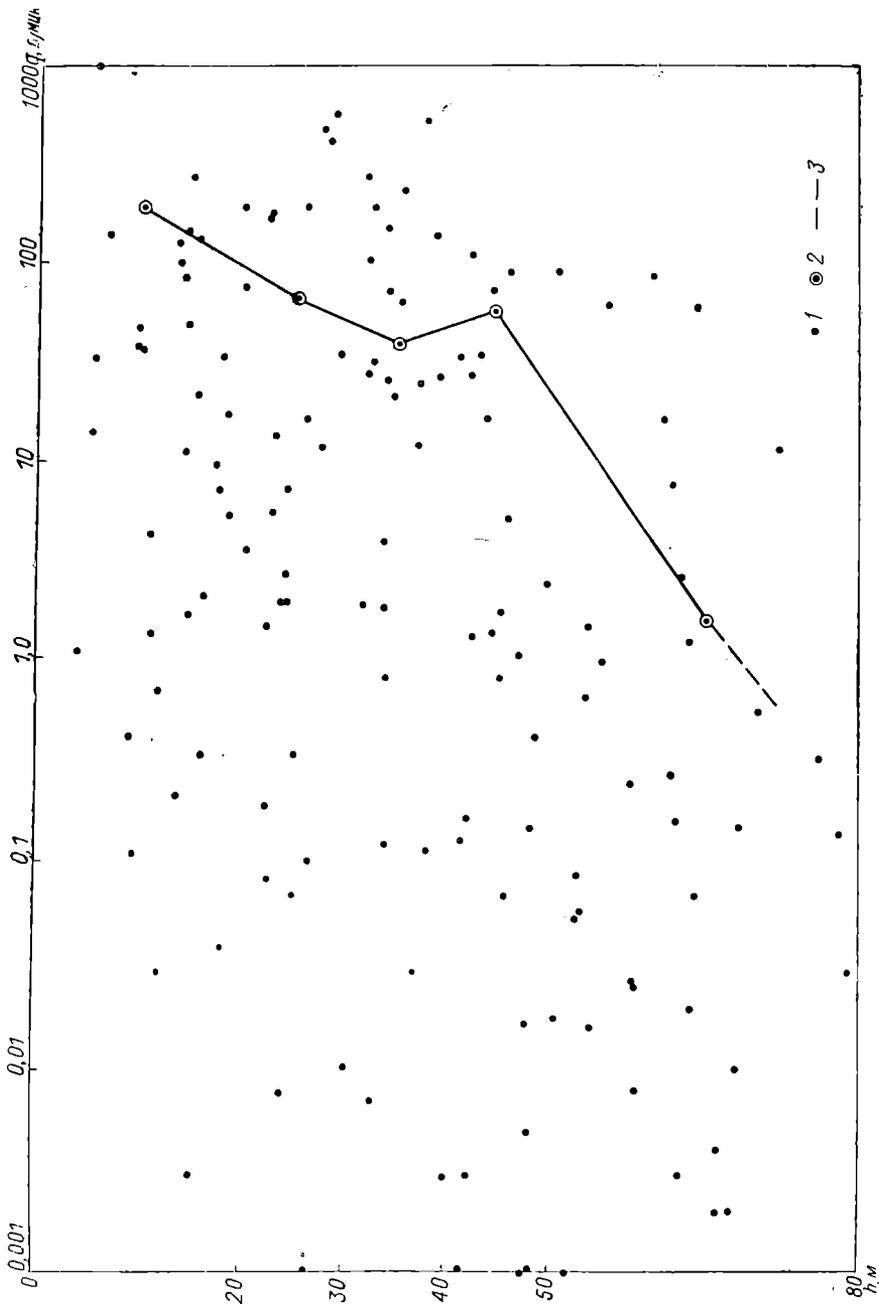


Рис. 9.3 Схема комплексного графика исследования скважины (при изысканиях для гидротехнического строительства),



I — выход керна, %; II — скорость чистого бурения, см/ч; III — удельное водопоглощение, л/мин; IV — ориентировочная величина коэффициента фильтрации по данным расходомерии, м/сутки; V — удельное электрическое сопротивление, ом·м; VI — скорость распространения упругих волн по данным сейсмокаротажа, м/сек. 1 — угол падения преобладающих трещин (для вертикальных скважин); 2 — число трещин на 1 м (по данным описания керна); 3 — зоны дробления и интенсивной тектонической трещиноватости; 4 — удельное водопоглощение при поинтервальных нагнетаниях; 5 — то же, при откачках.



2) при достаточном количестве наблюдательных скважин планы депрессионной воронки в гидро- или пьезоизогипсах при различных режимах.

III. По данным наблюдений при взаимодействии группы скважин:

1) план расположения всех скважин с нанесением основных данных по каждой скважине (глубины залегания исследуемого водоносного горизонта, статического и характерного динамического уровня и т. д.) и по возможности схемы гидро- или пьезоизогипс для периода наиболее устойчивого режима;

2) график зависимости между суммарным дебитом группы и понижением уровня в характерных точках области депрессии;

3) геолого-литологические профили, проходящие через эксплуатационные и наблюдательные скважины, с показом их конструкции, статического и динамических уровней в характерные периоды работы группы.

ДЕФЕКТЫ И ИСКАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТАХ; СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

§ 9.3. Дефекты, вызванные неравномерностью хода опыта, неудовлетворительным состоянием фильтра и изменением проницаемости пород в приствольной зоне

Неравномерность хода опыта является распространенным недостатком опытных гидрогеологических работ. Путем тщательной регулировки неравномерность хода опыта может быть почти устранена при условии непрерывного контроля над дебитом или динамическим уровнем. Контроль над дебитом легко осуществим при измерении его счетчиками-водомерами или самописцами. Если же дебит измеряется объемным способом, то целесообразней вести контроль над положением динамического уровня, который при глубине до 5—7 м может измеряться простейшими приспособлениями, а при большей глубине электроуровнемером или пневматическим измерителем.

На части наблюдательных скважин при глубине уровня воды не более 80—100 м могут быть установлены самописцы — лимниграфы.

При откачках из глубоких водоносных горизонтов небольшой водообильности понижения уровней могут достигать сотен метров; измерения уровня производятся аппаратом Яковлева или резистивиметрами, а при глубине его более 300—500 м целесообразно применение эхолота [145].

Неравномерность откачки или нагнетания легче устранить, если производить в процессе опыта расчет мгновенного удельного дебита, как было указано выше, и наносить его на хронологический график.

Необходимо отметить, что на очереди создание простых и надежных автоматических устройств для автоматического поддержания заданного постоянного дебита. Разработка таких устройств началась более 30 лет назад, но вследствие их сложности и малой пригодности для обычных полевых условий они не получили распространения.

На ход и результаты откачек может влиять «пескование» скважины, т. е. вынос мелких частиц, вымываемых из пород. При откачках из рыхлых пород пескование является следствием неправильного подбора или установки фильтра или его повреждения, а также неудовлетворительной подготовки (освоения) скважины. В последнем случае пескование постепенно прекращается. Если же оно продолжается длительное время, то следует уменьшить дебит откачки, и если это не приводит к прекращению выноса мелких частиц, переоборудовать скважину — установить новый фильтр. Если позволяет диаметр фильтра, то можно спустить в него второй фильтр с более мелкими проводящими воду ячейками.

При песковании скважины до принятия того или иного решения необходимо регулярно измерять количество мелкого материала, выносимого в единицу времени, что возможно путем отстаивания воды в мерном цилиндре и измерения объема осадка.

Вынос мелкого материала из трещиноватых или закарстованных пород можно обычно устранить уменьшением дебита или, если это технически возможно, спуском в скважину фильтра.

Кольматация пород в пристволенной зоне может существенно влиять на проведение нагнетаний и особенно продолжительных закачек при исследовании поглощающих скважин. Особенно быстро кольматация возникает в мелкопористых и тонкотрещиноватых породах при содержании в воде коллоидов, в частности водной окиси железа, образующейся на поверхности труб. Для устранения кольматации скважины должны периодически промываться, прокачиваться и, если это оказывается недостаточным, подвергаться свабированию, как только обнаружится снижение удельного дебита поглощения. Если эти мероприятия приводят к цели, то удельный дебит при откачке и закачке становится примерно одинаковым (для напорных горизонтов).

При откачках из водоносных горизонтов большой мощности и водообильности часто имеет место неравномерный водоприток по стволу скважины (даже в однородных по вертикали горизонтах), что может быть установлено расходомерией. Указанное вызывает ошибки значений определяемых параметров, поэтому в ряде случаев более надежные результаты получаются при исследовании горизонта по частям, т. е. при последовательном проведении нескольких поинтервальных откачек, что позволяет также применять насосы меньшей мощности.

В глубоких скважинах, пробуренных для искусственного заводнения нефтяных пластов для борьбы с кольматацией пород

водной окисью железа, смываемой с поверхности труб, в воду добавляется тринатрийфосфат, образующий тонкую корку, противостоящую коррозии [104]. Это мероприятие рекомендуется применять также при закачках, проводимых для определения проницаемости поглощающих скважин и для других целей.

Вода, предназначенная для закачек, должна заключать минимальное количество взвешенных частиц, зависящее от размеров и формы поперечного сечения проводящих каналов. Согласно опыту искусственного заводнения нефтяных пластов для мелкопористых и тонкотрещиноватых пород содержание взвешенных частиц не должно превышать 3—5 мг/л, что часто может быть достигнуто только путем специальной подготовки воды. Для опытных закачек, по-видимому, можно допустить в несколько раз большее содержание взвешенных частиц, которое рекомендуется устанавливать опытным путем, причем для пористых пород (рыхлых и цементированных) можно ограничиться лабораторными исследованиями.

Необходимо также учитывать возможность выпадения дисперсных слаборастворимых осадков на границе раздела пластовой и закачиваемой воды при их смешении. Эти осадки кольматируют породы, что занижает величины проницаемости. Так, например, при смешении закачиваемых гидрокарбонатно-кальциевых вод со щелочными карбонатно-натриевыми пластовыми водами может выпасть карбонат кальция; смешение закачиваемой воды, содержащей растворенный кислород, с подземными водами, содержащими двухвалентный ион железа, приводит к выпадению коллоидной водной окиси железа, обладающей высокой способностью кольматировать породы; смешение гидрокарбонатно-кальциевых вод с сульфатно-натриевыми водами значительной минерализации может вызвать выпадение гипса или ангидрита (некоторые сведения о подобных процессах имеются в статье автора [71]). Эти процессы можно предвидеть, зная химический состав подземных вод и воды, предназначенной для закачки, а также учитывая условия физико-химического равновесия водных растворов при температуре и давлении на уровне исследуемого горизонта. Предотвращение их возможно путем применения для закачки воды другого химического состава или соответствующей химической подготовки имеющейся воды.

§ 9.4. Особенности опытных гидрогеологических работ при переменной минерализации, большой газонасыщенности и высокой температуре подземных вод

Высокая, быстро уменьшающаяся кверху минерализация наблюдается у подземных вод, насыщающих проницаемые породы, залегающие в кровле соляных залежей. Непосредственно на поверхности залежи минерализация воды всегда близка к полному насыщению, а на меньшей глубине может уменьшаться до величины,

соответствующей пресной воде. При негоризонтальной поверхности соляной залежи изменение минерализации в вертикальном направлении неодинаково; в местах более глубокого залегания солей мощность зоны рассолов, близких к насыщению, может увеличиться до нескольких десятков метров, а на поверхностных участках часто равна всего нескольким метрам.

Высокая, нередко сложно изменяющаяся минерализация характерна также для засоленных грунтовых вод засушливых областей.

Особенности опытных работ в рассматриваемых условиях связаны с повышенной плотностью высокоминерализованных вод, обусловленной преимущественно наличием хлористого натрия. Плотность растворов хлористого натрия при температуре 10°C и содержаниях 2, 6, 8, 10, 14, 18, 22 и 26% соответственно 1,014, 1,044, 1,059, 1,074, 1,105, 1,136, 1,169 и 1,203 кг/м^3 . Существенно влияет также наблюдаемая обычно стратификация воды по плотности. Меньшее значение имеет повышенная вязкость рассолов (рис. 3.2). Движение подземных вод при опытах часто также сильно усложняется вследствие большой фильтрационной неоднородности пород, покрывающих соляные залежи, обычно трещиноватых и часто закарстованных.

Точные решения, описывающие фильтрацию вод высокой минерализации, стратифицированных по плотности, получены П. Я. Полубариновой-Кочиной [123] и Н. К. Гириным [44] для двух слоев различной плотности.

Для подземных вод с плотностью, непрерывно изменяющейся в различных направлениях, расчетные зависимости для приведения уровней воды в скважинах к сопоставимым величинам рассматриваются в ряде работ. Довольно широко распространена схема А. И. Силина-Бекчурина [137], однако она правильна только при горизонтальной стратификации рассолов.

Далее приводятся только основные положения, базирующиеся на приближенных зависимостях, полученных автором и учитывающих изменение плотности воды как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, что имеет место при опытных фильтрационных работах [58].

1. Фильтрационные свойства горных пород для горизонтов или зон, содержащих подземные воды высокой минерализации, стратифицированные по плотности, должны определяться только посредством откачек, так как при закачке воды, имеющей постоянную минерализацию (обычно небольшую), первоначальная стратификация подземных вод существенно нарушается и движение их становится настолько сложным, что надежный расчет фильтрационных параметров становится невозможным. Кроме того, для подземных вод, развитых в породах, покрывающих соляные залежи, закачка слабоминерализованных вод может вызвать интенсивное растворение солей, что еще более усложняет создающиеся условия.

II. При откачке из совершенной скважины, не закрепленной фильтром или имеющей фильтр с малым сопротивлением, первоначальная стратификация минерализованных вод практически остается неизменной. Смешение вод различной минерализации происходит в скважине, и откачиваемая или самоизливающаяся вода приобретает некоторую среднюю минерализацию [122].

III. При откачке из несовершенной скважины в рассматриваемых условиях стратификация подземных вод различной минерализации изменяется так, что изоповерхности минерализации воды и соответствующей ей плотности, первоначально почти горизонтальные, приобретают форму опрокинутых депрессионных воронок.

Формируются эти поверхности во время откачки аналогично развитию депрессионной воронки у безнапорных вод и со скоростью того же порядка, зависящей от интенсивности откачки и степени пустотности водоносных пород. Минерализация откачиваемой воды возрастает и стабилизируется так же, как положение изоповерхностей плотности, т. е. наступает период практически установившегося движения подземных вод.

При небольшом понижении уровня наиболее концентрированные рассолы не «подсасываются» скважиной; их граница с поступающими в скважину подземными водами приобретает куполовидную форму, которая в период установившегося режима может рассматриваться как водоупор. На рис. 9.5 изображена схема установившегося притока воды к несовершенной скважине из безнапорного горизонта при горизонтальном непроницаемом ложе и первоначальной горизонтальной стратификации вод различной плотности. Высота «купола» неподвижных рассолов H_p определяется следующей зависимостью

$$H_p = S_c \frac{\gamma_0}{\gamma_1 - \gamma_0}, \quad (9.2)$$

где γ_1 — средняя плотность неподвижных рассолов; γ_0 — плотность подземной воды на уровне свободной поверхности безнапорных вод или на почве кроющего непроницаемого пласта для напорного горизонта.

Для схемы, изображенной на рис. 9.5, принято $\gamma_1 = 1,15$; $\gamma_0 = 1,0$; $S_c = 2$ м, что дает $H_p = 13,3$ м. Депрессионная воронка на рис. 9.5 показана в увеличенном вдвое вертикальном масштабе.

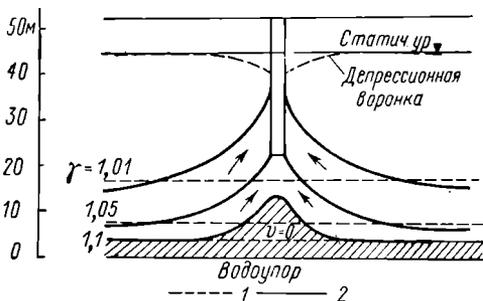


Рис. 9.5

Схема движения подземных вод с переменной плотностью при откачке из несовершенной скважины [58].

1 — изоповерхности плотности воды до откачки; 2 — линии тока при откачке.

Определение коэффициента проницаемости по данным откачки в рассматриваемых условиях сводится к решению задачи о водопритоке к несовершенной скважине при куполовидной форме непроницаемого ложа. Эта задача точно может быть решена только путем моделирования, например на установке ЭГДА для пространственного радиального потока.

Приближенно коэффициент проницаемости можно рассчитать по формуле для несовершенной скважины при горизонтальном водоупоре, находящемся на уровне середины высоты «купола» неподвижной воды.

В качестве примера приведем результаты расчета по схеме Н. Н. Веригина [29] для условий, соответствующих рис. 9.5, при следующих исходных данных: $Q = 100$ м³/сутки или $1,16 \times 10^3$ см³/сек, $R = 1000$ м, $r_c = 0,1$ м, $S_c = 2,5$ м и соответственно $\Delta p = 1,05 \cdot 0,1 \cdot 2,5 = 0,63$ кгс/см² ($\gamma = 1,05$ г/см³), $H = 40$ м, $l_c = 20$ м, $\eta_c = 1,5$ спз (для откачиваемой воды, имеющей $\gamma = 1,06$ и температуру 7° С). Расчет дает $k_p = 300$ дарси.

IV. При кустовых откачках уровень воды, находящейся в наблюдательных скважинах, зависит от ее средней плотности и высотного положения открытого или закрепленного фильтром интервала. Поэтому понижения уровня воды в наблюдательных скважинах могут служить для расчета фильтрационных параметров только после выполнения преобразований и некоторых других условий, что рассмотрено ниже.

1. Наблюдательные скважины должны быть оборудованы короткими (теоретически точечными) фильтрами.

2. По данным минерализации воды в наблюдательных скважинах определяется плотность ее γ_n и рассчитывается приведенная высота столба воды l_{np} по формуле

$$l_{np} = l \frac{\gamma_n}{\gamma_0}, \quad (9.3)$$

где l — фактическая длина столба воды (отсчитываемая от середины фильтра); γ_0 — плотность пресной воды ($\gamma_0 = 1$).

Очевидно, что минерализация воды в наблюдательной скважине должна быть на всем протяжении ее одинаковой, что проверяется резистивиметром. Если это условие не удовлетворено, то по данным резистивиметрии устанавливается средняя минерализация воды и соответствующая ей плотность. Для неглубоких скважин можно произвести также перемешивание воды в скважине.

По длине приведенного столба воды определяется высотная отметка или глубина приведенного уровня.

3. Приведенные уровни в наблюдательных скважинах могут служить для расчета проницаемости по данным кустовых откачек только при одинаковом высотном положении середины их фильтров.

Если это условие не удовлетворено, то рассчитывается для всех скважин приведенный уровень для отметки середины фильтра, для чего служит формула

$$H = H_i - \int_{z_i}^z \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} dz \approx H_i - \frac{\gamma_{\text{ср}} - \gamma_0}{\gamma_0} (z - z_1), \quad (9.4)$$

где H_i — приведенный уровень скважины с высотной отметкой середины фильтра Z_i ; γ — переменная плотность воды в интервале высот z_i и z на участке i -й скважины; $\gamma_{\text{ср}}$ — средняя плотность воды в том же интервале.

Вычисление интеграла в формуле (9.4) или нахождение $\gamma_{\text{ср}}$ производится графическим путем на основании зависимости плотности от глубины на участке нахождения i -й скважины. Эта зависимость может быть получена посредством резистивиметрии или ориентировочно на основании общих закономерностей для данного участка.

Расчеты по формулам (9.4) являются приближенными, так как не учитывают того, что минерализация может зависеть также от координат x и y , соответствующих горизонтальной плоскости.

Более подробные сведения и доказательства изложенных положений и зависимостей имеются в работе автора [58].

Приведенный к пресной воде динамический уровень, очевидно, должен быть рассчитан и для центральной скважины опытного куста.

После преобразования уровней параметры рассчитываются по обычным формулам для кустовых откачек.

Расчет параметров по данным кустовых откачек из несовершенных скважин при переменной плотности воды может быть еще более неточным, чем подобные расчеты, проводимые для обычных условий. Дополнительной причиной погрешностей в данном случае является значительное и неодинаковое на различных участках потока подземных вод влияние плотности на скорость фильтрации. Поэтому необходимость расположения фильтров центральных и наблюдательных скважин на одном уровне (см. § 4.4) в данном случае еще более существенна, а проведение откачек по возможности из совершенных скважин еще более желательно.

Высокое газосодержание в подземных водах сильно влияет на проведение опытных работ и расчеты фильтрационных параметров.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные при гидрогеологических исследованиях условия: выделение газа только в стволе скважины, что имеет место при забойном давлении, большем давления насыщения при всех режимах откачки или самоизлива. Основные сведения, относящиеся к этому случаю, преимущественно взяты из статьи автора [63]; более подробно рассмотрен этот вопрос в статье К. Ф. Богородицкого [18].

Главной причиной усложнения опытных гидрогеологических работ в данных условиях является образование в скважине столба газовой эмульсии, имеющей плотность меньше, чем у воды, не содержащей свободного газа, и уменьшающуюся в направлении снизу вверх вследствие все большего выделения газа и расширения газовых пузырьков, вызванного уменьшением давления. Это приводит к тому, что динамический уровень при откачке или самоизливе устанавливается на меньшей глубине, чем для чистой воды. Уменьшение глубины динамического уровня больше всего при свободном изливе воды без противодействия, причем самоизлив может происходить при статическом уровне, находящемся ниже устья. При самоизливе с противодействием, создаваемым штуцером или задвижкой, динамический уровень, рассчитанный по давлению на устье, также получается находящимся на меньшей глубине, но меньше отклоняется от истинного динамического уровня, соответствующего воде, не содержащей свободного газа.

При герметизации самоизливающейся скважины с целью определения статического уровня на основании давления на устье в верхней части скважины обычно скапливается газ, вследствие чего давление возрастает и рассчитанное понижение статического уровня также получается превышающим истинное.

Автором разработана расчетная схема и получены следующие зависимости для определения истинного (исправленного) динамического уровня.

1. Первоначально рассчитывается высота столба газовой эмульсии $h_э$ (в метрах) по формуле [143]

$$h_э = \frac{10}{\gamma_в} \left[\left(1 - \frac{V_0 p_0 \tau}{p_г} \right) (p_г - p_1) + V_0 p_0 \tau \ln \frac{p_г}{p_1} \right], \quad (9.5)$$

где $\gamma_в$ — плотность воды, г/см³; V_0 — газовый фактор, т. е. отношение объема газа, приведенного к нормальным условиям, к объему воды; p_0 — атмосферное давление, кгс/см²; p_1 — полное давление на устье, т. е. сумма давления по манометру и атмосферного; $p_г$ — упругость растворенного газа при средней температуре верхней части скважины; τ — температурный коэффициент, $\tau = 1 + t/273$, где t — температура, °С.

Высота истинного динамического уровня по отношению к устью скважины рассчитывается по формуле

$$h_д = \frac{10(p_г - p_0)}{\gamma_в} - h_э. \quad (9.6)$$

2. Для определения истинного статического уровня по давлению на устье при герметизации скважины первоначально определяется высота столба газа, выделяющегося из воды:

$$h_г = \frac{5V_0 p_0 \tau (p_г - p_1)^2}{\gamma_в p_1 p_г}. \quad (9.7)$$

Высота истинного статического уровня по отношению к устью скважины

$$h_c = \frac{P_1 - P_0}{\gamma_B} - h_r. \quad (9.8)$$

Формула (9.5), применяемая для определения истинного динамического уровня, ориентировочна, так как основана на законе Генри для растворимости газов при различном давлении, от которого часто наблюдаются отклонения, в частности возможно образование пересыщенных газом растворов. Уравнение состояния при выводе формулы принято для идеального газа, что также является приближенным. Кроме того, расчетная схема не учитывает влияния всплывания пузырьков газа на плотность газовой эмульсии, сил поверхностного натяжения на поверхности газовых пузырьков и гидравлических потерь при движении воды и эмульсии по стволу скважины.

Гидравлические потери можно рассчитывать сравнительно просто, однако определение их для газовой эмульсии неточно, так как для нее отсутствуют надежные значения коэффициента сопротивления и состав эмульсии меняется при ее движении по скважине кверху.

По-видимому, имеет значение влияние на динамический уровень скорости всплывания газовых пузырьков. Однако введение в расчеты обоснованных поправок на этот процесс невозможно, поскольку скорость всплывания зависит от диаметра пузырьков, который сколько-нибудь надежно установить невозможно, тем более что он увеличивается по мере поднятия пузырьков вследствие уменьшения давления.

Причиной погрешностей нередко бывают также неточные определения газового фактора.

Расчетные схемы К. Ф. Бегородицкого приближенно учитывают перечисленные факторы, но они значительно сложнее и также неточны.

Формула (9.6) для определения истинного статического уровня основана на предположении, что в герметизированной скважине весь выделяющийся газ накапливается в верхней части. В действительности всегда происходит утечка газа, наибольшая в период закрытия задвижки, когда выделение газа из воды очень интенсивно. Поэтому формулы (9.7) и (9.8) дают положение статического уровня более низкое, чем фактическое (рис. 9.6).

Статический уровень самоизливающихся газифицирующихся скважин можно правильно установить, выпуская газ из герметизированной скважины до полного прекращения его выделения.

Исправленные динамические уровни, рассчитанные как указано выше, и правильно установленный статический уровень являются исходными величинами для расчетов параметров по формулам установившегося движения подземных вод. Опыт показывает, что статический уровень часто лучше всего определять

путем экстраполяции линии зависимости между дебитом и понижением уровня (обычно представляющей собой прямую) до оси ординат (рис. 9.7). Поэтому, а также для контроля результатов расчетов откачки, выпуск газифицирующих вод самоизливом следует проводить не менее чем при трех различных режимах.

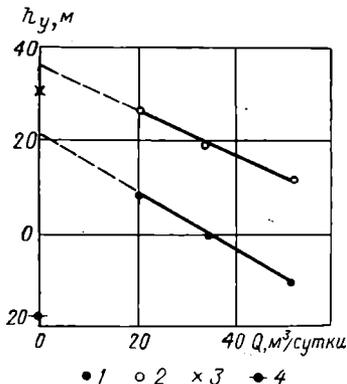


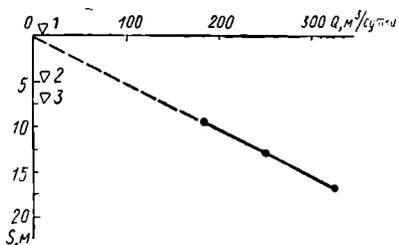
Рис. 9.6
Индикаторные линии при самоизливе из глубокой скважины и значительных газопроявлениях (Западная Сибирь, с. Видулово: интервал 1287—1290 м; $V_0 = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3$) [63].

Точки динамических уровней: 1 — истинный (исправленный), 2 — измеренный; статический уровень: 3 — соответствующий сохранению всего газа, выделяющегося из воды при герметизации скважины, 4 — соответствующий утчке всего газа, выделяющегося из воды после прекращения самоизлива.

При значительных дебитах и высоком газовом факторе неточность приведенных зависимостей возрастает. Поэтому в подобных условиях рекомендуется проводить расчеты исправленных динамических и статического уровней для предварительной ориентировки, а для определения фильтрационных параметров непосредственно измерять эти уровни следующими способами, исключая влияние газопоявлений:

Рис. 9.7
Индикаторная линия при исследовании водоносного горизонта в отложениях мезотиса (скважина на Славянско-Троицком месторождении, интервал перфорации 2022—1948 м; $V_0 = 2,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$; температура на глубине пласта 74°C ; минерализация воды 54 г/л) [62].

Положения статического уровня воды в пьезометре: 1 — установленное экстраполяцией; 2 — измеренное сразу после остановки скважины; 3 — установившееся при полной дегазации воды в пьезометре.



- 1) измерения уровня или устьевого давления в пьезометрах, опускаемых в скважины на глубину, большую высоты столба газовой эмульсии, и заполненных дегазированной водой;
- 2) измерения давления на глубине исследуемого горизонта глубинными манометрами;

3) измерения уровня или устьевого давления в наблюдательных скважинах, заполненных дегазированной водой.

Эти способы были применены на Славянско-Троицком месторождении промышленных вод в Краснодарском крае для трех

горизонтов неогена, образованных плотными песками с прослоями глины.

При исследованиях, проведенных в 1961—1964 гг. нефтепромысловым управлением Приазовнефть совместно с ВНИИГалургии [62], был произведен 41 опыт на одиночных скважинах и 6 на узлах с одной наблюдательной скважиной. Глубина скважин была от 1725 до 2290 м, мощность исследуемых горизонтов от 11,5 до 50 м, газовый фактор от 1,6 до 2,6, чаще всего около $2 \text{ м}^3/\text{м}^3$, газ метановый (84,5—93,6% CH_4); общая минерализация воды от 25 до 75 г/л (наиболее высокая у более глубоких горизонтов), температура воды на глубине исследованных горизонтов от 78 до 81° С. Проницаемость пород у всех изученных горизонтов была почти одинаковой (в среднем 0,37—0,41 дарси). Большинство скважин самоизливалось, хотя статический уровень находился на 12—35 м ниже устья.

Выпуск газирующей воды производился или через фонтанные трубы диаметром 2,5 или 4", служившие также для промывки скважин, или через кольцевое пространство между обсадными и фонтанными трубами. Дебит самоизлива был обычно 300—400 $\text{м}^3/\text{сутки}$; соответствующие понижения уровня от 15 до 35 м.

При самоизливе через фонтанные трубы и при компрессорных откачках пьезометром служило кольцевое междутрубное пространство, а при самоизливе через междутрубное пространство — фонтанные трубы.

Пластовая вода в пьезометре постепенно дегазировалась и в неработающей скважине устанавливалась на практически неизменном уровне. У некоторых скважин в фонтанных трубах оставалась промывочная пресная вода с плотностью, меньшей, чем у пластовой воды. В этом случае верхняя часть труб герметизировалась и измерялось устьевое давление образцовым манометром.

По данным измерений уровня или устьевого давления в пьезометрах строилась индикаторная линия, для всех скважин очень близкая к прямой. Статический уровень определялся посредством экстраполяции (рис. 9.7), и соответствующие ему понижения уровня служили для расчетов проницаемости по формуле Дююи.

Ход восстановления давления на устье после остановки самоизливающейся скважины при наличии газопроявлений существенно нарушается, и график с логарифмическим масштабом времени приобретает выпуклую форму с максимумом, соответствующим времени прекращения интенсивного выделения газа. Кроме того, часто выделение газа происходит неравномерно, что также искажает этот график и вызывает затруднения при нахождении прямолинейного участка, являющегося основой для определения параметров.

Оборудование пьезометров с дегазированной водой исключает влияние газопроявлений на статический и динамический уровни, что было многократно проверено при исследовании скважин на Славянско-Троицком месторождении.

Измерение давления на глубине 1700—1800 м геликсным глубинным манометром МГГ-2У не дало на Славянско-Троицком месторождении удовлетворительных результатов, так как погрешность измерений этим манометром около 0,35—0,5%, что при указанной глубине спуска прибора соответствует примерно 0,7—1,0 кгс/см², т. е. величине того же порядка, что и имевшая место депрессия давления. Вообще же глубинные манометры данного типа дают приемлемые результаты при больших депрессиях и применяются в нефтепромысловой практике.

Для получения более точных данных о ходе восстановления забойного давления после остановки скважины применяются глубинные дифференциальные манометры типа ДГМ-4 [158], действие которых основано на сжатии и расширении постоянного количества воздуха, находящегося в приборе. Эти приборы значительно чувствительней геликсных манометров, но много сложнее их, требуют специальной тарировки, поправок на температуру, а также значительно более высокой квалификации технического персонала. На Славянско-Троицком месторождении применение дифференциального манометра ДГМ-4 дало на нескольких скважинах удовлетворительные результаты, в частности позволило устранить влияние температурной «усадки» (см. ниже).

Общим недостатком глубинных манометров является короткий срок их действия и длительность спуска и подъема, иногда сопровождаемых авариями (обрыв проволоки, заклинивание прибора и т. п.).

Наиболее точные результаты, очень хорошо согласующиеся друг с другом при различных режимах, были получены при опытах с наблюдательными скважинами. Расчет по формулам (4.52) и (4.53) дал указанные выше значения проницаемости, а также вполне надежные величины коэффициента пьезопроводности $[(2 \div 3) \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сутки}]$. Расстояние до наблюдательных скважин от опытной достигало 500 м.

Глубинные измерения давления необходимы при давлении насыщения, меньшем пластового, т. е. при наличии газовой «шапки». Однако при высоком расходе воды и газа (например, при образовании газлифта) эти измерения связаны с техническими трудностями и даже бывают невыполнимыми.

Примером подобных условий является Берикейское месторождение промышленных вод (см. § 2.4). На скважинах этого месторождения произвести глубинные измерения давления не удалось из-за высокого дебита воды и газа.

Для предварительного определения фильтрационных параметров трещиноватых известняков верхнего мела имелись сравнительно надежные данные только по одной скважине глубиной 1063 м, пробуренной в 1968 г. Эта скважина прошла 322 м в верхнемеловых известняках, имеющих мощность около 400 м. Известняки в скважине не были перекрыты трубами. Скважина свободно самоизливалась газовой водой при дебите воды 2750 м³/сутки.

Газовый фактор был в среднем около $3 \text{ м}^3/\text{м}^3$; газ метановый, минерализация воды 70 г/л , температура на глубине 900 м , т. е. в середине вскрытой части толщи известняка, 58° С . При этих данных упругость растворенного газа, рассчитанная по методу А. Ю. Намиот и М. М. Бондаревой [106], равна 232 кгс/см^2 .

Для определения фильтрационных параметров известняков были получены дополнительно следующие исходные данные:

1) давление на глубине 900 м , рассчитанное по формуле (9,5) (несколько видоизмененной вследствие заполнения газо-водяной эмульсией всей скважины), равно $68,3 \text{ кгс/см}^2$;

2) статическое (пластовое) давление на той же глубине соответственно статическому давлению на устье $4,8 \text{ кгс/см}^2$ равно $96,6 \text{ кгс/см}^2$, что дает депрессию давления $19,3 \text{ кгс/см}^2$.

Расчеты по формуле Дюпюи дали величину среднего коэффициента проницаемости $0,045$ дарси (коэффициент фильтрации при вязкости воды $0,56 \text{ спз}$ и $\gamma_w = 1,02 \text{ г/см}^3$ равен $0,071 \text{ м/сутки}$) (см. § 2.4). Несовершенство скважины не учитывалось, так как она прошла 80% изучаемой толщи известняков.

При исследовании глубоких водоносных горизонтов с термальной водой наблюдается температурная «усадка» столба воды в скважине, затрудняющая правильное определение статического уровня и сильно искажающая график восстановления уровня после остановки скважины. В значительно меньшей степени температурная усадка влияет на динамические уровни.

Температурная усадка вызывается неодинаковым распределением температуры по глубине в работающей скважине и во время самоизлива или откачки и связанным с этим тепловым расширением или сжатием воды.

В скважине, не работающей длительное время (до пуска или через значительный промежуток времени после остановки), устанавливается тепловое равновесие между водой и окружающими скважину породами, почему температура воды закономерно понижается кверху соответственно геотермической ступени. При откачке или самоизливе это тепловое равновесие нарушается вследствие переноса тепла кверху движущейся по скважине водой, и разность между температурой воды у забоя и около поверхности значительно уменьшается. После остановки скважины тепловое равновесие постепенно вновь восстанавливается.

В работающей скважине столб воды имеет меньшую длину, чем после прекращения самоизлива или откачки.

Несмотря на небольшой коэффициент теплового расширения, изменение длины столба воды большой высоты может быть того же порядка, что и понижение уровня при откачке или самоизливе. Поэтому статический уровень воды, полученный непосредственным измерением или рассчитанный по давлению на устье, в скважине долгое время не работающей, расположен ниже, чем спустя непродолжительное время после остановки скважины. Положение

статического уровня вообще зависит от средней температуры воды в исследуемой скважине.

Эти явления привели к необходимости при обработке данных исследования глубоких скважин в районе Славянско-Троицкого месторождения определять статическое давление путем экстраполяции как начальную точку индикаторной линии, что иллюстрируется рис. 9.7. Установленный таким образом статический уровень соответствовал средней температуре воды в скважине во время самоизлива или откачки, которая была почти одинаковой при различных режимах.

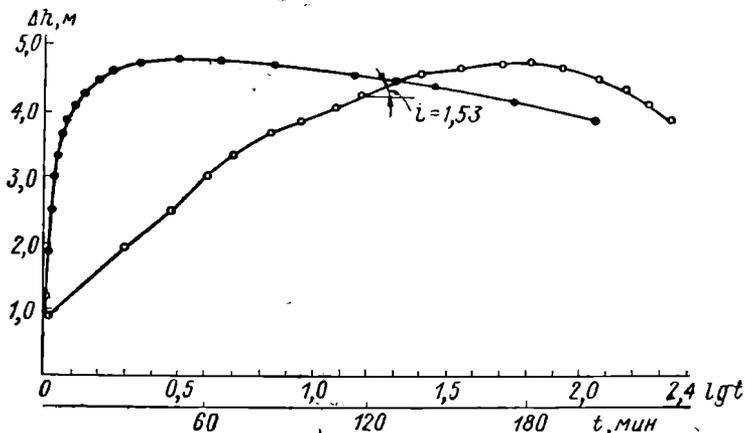


Рис. 9.8
График восстановления уровня после остановки скважины (Славянско-Троицкое месторождение, интервал перфорации 2022—1948 м; остальные данные см. на рис. 9.7).

Влияние описываемых явлений на ход повышения уровня (или давления на устье) после остановки скважины заключается в замедлении последнего из-за одновременно происходящего остывания воды и уменьшения длины («усадки») столба воды. Процесс усадки затухает значительно медленнее, чем подъем уровня, вследствие чего кривая зависимости повышения уровня от времени имеет обычно максимум, соответствующий моменту одинаковой скорости обоих процессов. В дальнейшем наблюдается медленное понижение уровня, постепенно приближающегося к соответствующему тепловому равновесию. Влияния газопроявления и температурной усадки сходны, но газопроявления сразу после остановки скважины воздействуют на уровень воды очень интенсивно, хотя их действие быстро затухает, а температурная «усадка» представляет собой длительный процесс. Оборудование пьезометров с дегазированной водой исключает влияние газопроявлений на уровень воды, но действие температурной усадки остается в силе.

Влияние температурной усадки на график восстановления уровня или давления с логарифмическим масштабом времени может сильно затруднить правильное нахождение прямолинейного отрезка этого графика и уклона i и вызвать большие ошибки соответствующих значений параметров (рис. 9.8). Устранить искажающее влияние температурной усадки можно путем глубинных измерений давления. При небольших депрессиях давления, как показал опыт исследования скважин на Славянско-Троицком месторождении, следует применять дифференциальные глубинные манометры.

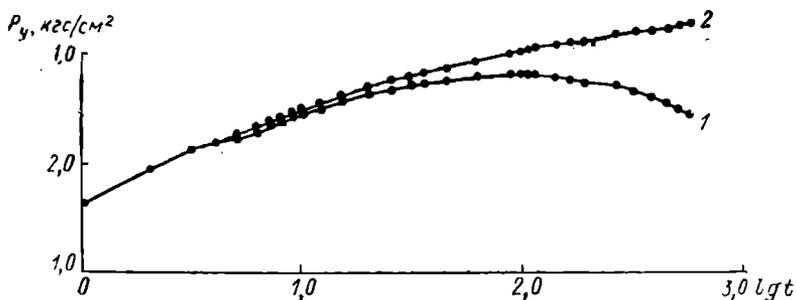


Рис. 9.9
Графики восстановления давления после остановки скважины (Славянско-Троицкое месторождение; интервал перфорации 2041,2—1958,8 м; $V_0 = 2,1 \text{ м}^3/\text{м}^2$; температура на уровне пласта 75°С ; минерализация воды 57 г/л) [62].
1 — график построен по данным измерения давления образцовым манометром без введения поправок; 2 — то же, с поправкой на температурную усадку, полученную по данным термокаротажа.

На том же месторождении для нескольких скважин производился периодический термокаротаж и по данным термограмм определялось уменьшение высоты водяного столба в пьезометрах с дегазированием водой вследствие ее остывания и вводились поправки на устье. Эти эксперименты дали более полное представление о процессе температурной усадки, но применение термокаротажа оказалось еще более трудоемким методом, чем глубинные измерения давления дифференциальным манометром. Графики, полученные при одном из таких опытов, показаны на рис. 9.9.

Влияние температурной усадки исключается также расчетами параметров по данным понижения уровня хотя бы в одной наблюдательной скважине, если в ней установилось тепловое равновесие между водой и окружающими породами.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОЗУ РАДИУСА ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ ВОДОЗАБОРОВ

Современные представления о радиусе влияния (радиусе депрессионной воронки) и основные зависимости для его определения рассмотрены во второй части книги (см. § 4.7). Эти зависимости предназначены для расчета радиуса влияния по фактическим

Формула	Условия применения
<p>Теоретически обоснованные формулы</p> $R^* \sqrt{1g R^* - 1g r_0 - 0,217} =$ $= 0,66 \sqrt{\frac{k}{w} S_0 (2H - S_0) - 0,5r_0^2};$ $R^* = 1,65R \quad (10.1)$	Безнапорный водоносный горизонт, питаемый за счет инфильтрации и на водоразделе
$R = \sqrt{r_0^2 + R_0^2 \frac{S_0 (2H - S_0)}{S_c (2H - S_c)}} \quad (10.2)$	Гидрогеологические условия те же, что и для формулы (10.1). Прогноз R для проектируемых водозаборов на основании значения R_0 , полученного при опытах
$R_t = \sqrt{r_0^2 + \alpha \frac{k}{\Phi} (H - 0,5S_0) t} \quad (10.3)$	Безнапорный горизонт при пренебрежимо малом питании
$R_t = \sqrt{r_0^2 + \alpha \chi t} \quad (10.4)$	Напорный горизонт, не имеющий питания на площади депрессии
$R = 2a_p - r_0 \quad (10.5)$	Открытые выработки и групповые установки, расположенные у берега реки или другого водосема
<p>Приближенные и эмпирические формулы</p> $R = r_0 + 2S_0 \sqrt{kH} \quad (10.6)$	Безнапорные воды в рыхлых породах при $m = 0,2 \div 0,3$
$R = \sqrt{r_0^2 + 30kHS_0 (1 + 0,0015r_0^2)} \quad (10.7)$	Для тех же условий, что и формула (10.1)

данным откачки из одной или нескольких скважин, дебит которых является известной непосредственно измеряемой величиной.

В данной главе ставится задача прогноза ожидаемого радиуса влияния для проектируемого нового крупного водозабора (горных выработок, котлованов, водопонизительных установок, групп взаимодействующих эксплуатационных скважин и т. п.). При решении этой задачи дебит водозабора является неизвестной величиной, так же как радиус влияния. Прогноз ожидаемого радиуса влияния в данном случае имеет значение не только для определения водопритока, но также нередко для оценки влияния

Таблица 10.1

Основные формулы для определения радиуса влияния крупных водозаборов

Автор	Примечание
Е. Е. Керкис [69, 144]	R^* — фактический радиус депрессионной воронки; R — приведенный установившийся радиус влияния; S_0 — понижение уровня в самой низкой точке почвы выработок или в центре групповой установки плюс 1—3 м; r_0 — приведенный радиус водозабора, рассчитываемый по зависимостям, приведенным в литературе [6, 69]. R определяется методом подстановки или по графику [144]
То же	S_0 и r_0 имеют то же значение, что и в формуле (10.1)
Ф. М. Бочевер, И. Н. Вергин [144]	R_t — неустановившийся радиус влияния; φ — коэффициент водоотдачи; α — зависит от режима откачки и обычно принимается в пределах от 2,25 до 4; χ — коэффициент пьезопроводности; α — имеет одно и то же значение в формулах (10.3) и (10.4)
То же	
Ф. Форхгеймер (формула дополнена) [69, 144]	a_p — расстояние центра выработок или среднее взвешенное расстояние их контура от берега
И. П. Кусакин [144]	k измеряется в метрах в сутки, остальные величины в метрах. Формула дает грубоориентировочные, большей частью заниженные значения R ; S_0 — не более 40—50 м
И. П. Кусакин (формула преобразована автором) [69, 144]	Единицы измерения те же, что и в формуле (10.6). Применима для выработок и групповых установок значительно большей площади, чем формула (10.6), и при в несколько раз больших понижениях уровня. Значения R несколько заниженные

создающейся обширной области депрессии на существующее водоснабжение, поскольку размеры депрессионной воронки при длительной откачке большого количества воды могут достигать десятков километров.

Необходимо указать, что методы прогноза радиуса влияния крупных водозаборов преимущественно ориентировочны вследствие трудности количественной оценки многочисленных факторов, определяющих размеры депрессионной воронки.

Прогноз радиуса влияния крупных водозаборов может быть сделан путем расчетов, основанных на результатах опытных гидрогеологических работ или других исходных данных, характеризующих гидрогеологическую обстановку участка проектируемого водозабора, по формулам, приведенным в табл. 10.1, а также по аналогии с существующими водозаборами, находящимися в близких условиях.

Прогноз величины радиуса влияния по аналогии применяется для горнопромышленных районов, где в течение ряда лет проводятся гидрогеологические наблюдения. При составлении проекта новой шахты или рудника в таком же районе размеры зон влияния могут быть оценены по фактическим данным для других шахт, работающих длительное время, причем должны быть приняты во внимание зависимости радиуса влияния от времени, понижения уровня и размеров шахтного поля и т. д., соответствующие приведенным выше формулам; если эти зависимости удастся установить эмпирически, то прогноз является лучше всего обоснованным.

При прогнозе водопритока в горные выработки, проектируемые в новых неосвоенных районах, предварительная оценка величины ожидаемого радиуса влияния может быть произведена по аналогии с существующими шахтами и рудниками в других районах при сходных природных условиях.

Г Л А В А 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОСНОВНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ; СТЕПЕНЬ ИХ ОБОСНОВАННОСТИ И ТОЧНОСТИ

§ 11.1. Определение расчетных значений основных фильтрационных параметров элементарными способами и статистическими методами

Исходными данными для гидрогеологических расчетов, связанных с различными объектами строительства и другими народнохозяйственными мероприятиями, являются расчетные значения фильтрационных параметров. Основные параметры, правильность установления расчетных значений которых имеет наибольшее

значение, — это коэффициент фильтрации или проницаемость и водопроводимость толщи, пласта или проницаемой зоны*.

При постоянстве исследуемой толщи достаточно обоснованным расчетным значением этих параметров является среднее арифметическое. Это имеет место при коэффициенте изменчивости параметра не более 0,5 (табл. 1.1, гр. 1 и 2). При большей изменчивости параметра (табл. 1.1, гр. 3—5) может быть целесообразной элементарная статистическая обработка, рассмотренная в гл. 1, но только при достаточном числе значений параметра, приблизительно соответствующем данным табл. 11.1.

Таблица 11.1

Число значений основных фильтрационных параметров, необходимое для статистической обработки

Группа	Характеристика породы по степени изменчивости коэффициента проницаемости	Коэффициент изменчивости v	Необходимое число значений параметра
3	Изменяемая	0,5—1	20—30
4	Сильно изменяемая	1,0—2,0	30—40
5	Крайне изменяемая	2,0	Не менее 50—60

Кроме того, следует учитывать характер кривой распределения. Если эта кривая симметричная и плавная, то величины среднего арифметического, медианы и моды очень близки друг к другу и могут быть приняты как достаточно обоснованное значение расчетного параметра. При плавной, но асимметричной кривой распределения расчетной величиной параметра можно считать медиану или моду, обычно мало отличающиеся друг от друга.

Значительный разброс точек, препятствующий построению кривой распределения, может быть признаком недостаточного числа вариантов при значительной изменчивости фильтрационных свойств. Однако иногда в таких случаях удается построить плавную кривую распределения, считая варьирующей величиной логарифм коэффициента фильтрации (или водопроводимости) или значения другой функции, сглаживающей значительные колебания параметра.

В § 1.3 приведен пример построения графика распределения для $\sqrt[3]{k}$ трещиноватых известняков ордовика в Эстонской ССР. Это построение дало лучшие результаты, чем произведенное непосредственно для коэффициента фильтрации. По-видимому,

* Обработка данных лабораторных определений проницаемости в данной книге не рассматривается, поскольку она детально описывается (для различных лабораторных определений) в многочисленных работах и руководствах [76].

такой прием может дать удовлетворительные результаты для трещиноватых пород и в других районах, поскольку величина $\sqrt[3]{k}$ пропорциональна раскрытию трещин.

Статистическая обработка значений удельных водопоглощений, получаемых при проведении поинтервальных нагнетаний, часто производится более детально, например при исследованиях для крупного гидротехнического строительства, когда число опытов может достигать нескольких сотен, и заключается в следующем:

1) в составлении графиков рассеяния в координатах $\lg q$ и h , где q — удельное водопонижение, h — глубина от поверхности (иногда h заменяется высотной отметкой z) для всех исследованных скважин (рис. 9.4);

2) в разбивке общего графика рассеяния для каждой скважины на интервалы по 10 или 20 м по глубине (или высотной отметке) и расчете для каждого интервала среднего или характерного значения q ; при большом объеме фактических данных на интервале возможна статистическая обработка;

3) в построении на основании средних или характерных значений $\lg q$ на интервалах схематического графика зависимости удельного водопоглощения от глубины или высотной отметки.

Составляются также графики корреляционной связи удельного водопоглощения с параметрами, получаемыми при геофизических работах, и прочностными характеристиками пород. Методика указанной работы детально разработана А. М. Гуревым [49].

Объем и степень достоверности фильтрационных параметров позволяют в настоящее время только в отдельных случаях применять более детальные методы математической статистики, как, например, сопоставление фактических данных с нормальными законами распределения и получение аналитических зависимостей, описывающих эти закономерности распределения (см. § 1.3).

§ 11.2. Степень точности основных фильтрационных параметров; возможные и допустимые погрешности

Основные причины погрешностей, возникающих при определении фильтрационных параметров путем проведения опытных работ, и относительная величина их следующие.

1. Погрешности измерения дебита, статического и динамических уровней. При применении современной и исправной измерительной аппаратуры они не должны превышать соответственно 4—5 и 1—2%; таким образом, общая погрешность должна быть не более 5—7%. Если учесть также известную неравномерность хода опытов, то можно считать, что погрешности основных фильтрационных параметров, вызванные неточностью измерений, не должны быть более 10%. Однако эти величины должны рассматриваться как верхний предел и при тщательном проведении опытов и их равномерном ходе могут быть снижены до 3—4%.

2. Ошибки, вызванные закольматированностью пород, окружающих рабочую часть скважины, или засорением фильтра, при исследовании одиночных скважин могут быть настолько значительными, что величины параметров получаются совершенно не соответствующими действительности и результаты опытных работ должны считаться явным браком. Это может быть при неполной деглинизации неглубоких скважин, проведенных с глинистой промывкой (см. гл. 2).

Однако при тщательной и правильной подготовке скважин, проведенной до начала опытов, погрешность, вызванная данными факторами, при откачках обычно не превышает 10—12%, а при нагнетаниях и наливах, по-видимому, не более 20—25%.

Ошибки, вызванные повышением проницаемости пород в приствольной зоне вследствие суффозии и размыва трудно оценить. По-видимому, при отсутствии значительного выноса песка они того же порядка, что и при кольматации, но вызывают не занижение, а завышение проницаемости.

3. При расчетах основных фильтрационных параметров по данным исследования одиночных скважин причиной ошибок является также ориентировочность радиуса влияния. Однако если величина R определяется в соответствии с гидрогеологической обстановкой и условиями проведения опытов, эти ошибки редко превышают 8—10%.

4. Ошибки, обусловленные несоответствием применяемых формул реальным условиям, возникают нередко при исследовании несовершенных скважин (причины грубых ошибок, возникающих при неквалифицированном или формальном выборе расчетных формул не рассматриваются). Как было неоднократно указано, зависимости для несовершенных скважин применимы для изотропной и однородной среды, т. е. для несуществующих в действительности идеальных условий. Поэтому фактический приток воды к скважине может существенно отличаться от теоретической схемы, вследствие чего возникают ошибки при определении проницаемости, для анизотропных пород достигающие 30—40%. Такие же ошибки получаются при определении удельного водопоглощения по данным поинтервальных опытов.

На основании изложенного можно заключить, что погрешности основных фильтрационных параметров при удовлетворительном проведении исследований и подготовки скважин к опытам могут достигать приблизительно следующей величины; %:

Для откачек из одиночных совершенных скважин	15—25
Для нагнетаний и наливов в одиночные совершенные скважины	25—50
При кустовых откачках или нагнетаниях и использовании для расчетов только понижения уровня или давления в наблюдательных скважинах и совершенной центральной	5—40
То же, при несовершенной центральной скважине	10—15

Более высокие погрешности обычно имеют место при исследовании пород с очень высокой и высокой проницаемостью, а также слабопроницаемых.

Кроме погрешностей основных фильтрационных параметров, получаемых по данным отдельных опытов, могут иметь место дополнительные, возникающие при определении расчетных значений параметров. Эти погрешности наблюдаются преимущественно у пород с высокой изменчивостью вследствие недостаточного объема фактических данных, недостаточной представительности отдельных опытов, а также неправильной интерпретации результатов опытных работ. Примером последнего может служить принятое предварительно расчетное значение коэффициента фильтрации лихвинских доломитов в Селижаровском районе, оказавшееся в несколько раз заниженным (см. § 5.3).

Допустимые погрешности основных фильтрационных параметров и их знак (плюс или минус) зависят от задач и объектов исследования, а также их стадии. Приблизительная величина допустимых погрешностей приведена в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Допустимые погрешности основных фильтрационных параметров, %

Задачи и объекты исследований	Исследования		Знак погрешности
	Предварительные	Детальные	
Прогноз водопритока в горные выработки и котлованы	30—50	15—25	+
Оценка потерь на фильтрацию в основании гидротехнических сооружений, из каналов и водохранилищ	30—50	15—25	—
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод	20—30	10—15	—
Прогноз режима подземных вод на поливных землях и осушаемых территориях	50—75	25—35	—

Данные табл. 11.2 представляют приблизительный нижний предел допустимых погрешностей фильтрационных параметров; в ряде случаев могут быть допущены большие погрешности, так, например, при низкой водообильности горизонтов, обводняющих горные выработки, и поэтому незначительных водопритоках точность определений коэффициента фильтрации может быть значительно меньше. То же самое имеет место при оценке потерь на фильтрацию в основании гидротехнических сооружений, сложенных слабопроницаемыми породами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор полагает, что в области изучения фильтрационных свойств горных пород необходимо еще продолжить работу по следующим основным направлениям.

1. Установление, проверка и внедрение методов опытных фильтрационных работ минимальной продолжительности и стоимости, но достаточной надежности.

2. Усовершенствование технических средств и измерительной аппаратуры для опытных фильтрационных работ, в частности создание автоматических устройств для регулировки откачек и нагнетаний, модернизация и широкое внедрение самописцев.

3. Дальнейшее изучение фильтрационных свойств неоднородных пород (особенно трещиноватых и закарстованных) и установление наиболее надежных методов определения расчетных значений их проницаемости и других параметров.

4. Разработка и освоение методики применения ЭВМ для решения вопросов, возникающих при характеристике пород в сложных условиях и при обработке больших объемов цифровых данных.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ $E_i(-x)$

x	$E_i(-x)$	x	$E_i(-x)$	x	$E_i(-x)$
0,00	$-\infty$	0,50	-0,560	1,5	-0,100
0,05	-2,468	0,55	-0,503	2,0	-0,0489
0,10	-1,823	0,60	-0,454	2,5	-0,0249
0,15	-1,465	0,70	-0,374	3,0	-0,0130
0,20	-1,223	0,75	-0,340	3,5	$-0,697 \cdot 10^{-2}$
0,25	-1,044	0,80	-0,311	4,0	$3,78 \cdot 10^{-3}$
0,30	-0,906	0,85	-0,284	4,5	$2,07 \cdot 10^{-3}$
0,35	-0,794	0,90	-0,260	5,0	$1,15 \cdot 10^{-3}$
0,40	-0,702	0,95	-0,239	10,0	$4,16 \cdot 10^{-6}$
0,45	-0,625	1,00	-0,219	15,0	$1,92 \cdot 10^{-8}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТАБЛИЦА ФУНКЦИИ БЕССЕЛЯ $J_0(x)$

x	$J_0(x)$	x	$J_0(x)$	x	$J_0(x)$
0	+1	4	11,3	7,5	268,2
0,5	1,063	4,5	16,48	8	427,6
1	1,266	5	27,24	8,5	683,2
1,5	1,647	5,5	42,69	9	1094
2	2,28	6	67,23	9,5	1753
2,5	3,29	6,5	106,3	10	2816
3,5	7,378	7	168,6		

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ТАБЛИЦА ФУНКЦИЙ БЕССЕЛЯ $K_0(x)$

x	$K_0(x)$	x	$K_0(x)$	x	$K_0(x)$	Примечание
0,00	~	0,45	1,013	0,90	0,487	При $x < 0,1$ $K_0(x) \approx$ $\approx \left(0,577 + \ln \frac{x}{2} \right)$ При $x > 5$ $K_0(x) \approx$ $\approx e^{-x} \sqrt{\frac{\pi}{2x}}$
0,05	3,114	0,50	0,924	0,95	0,452	
0,10	2,427	0,55	0,846	1,00	0,421	
0,15	2,030	0,60	0,777	1,50	0,214	
0,20	1,753	0,65	0,716	2,0	0,114	
0,25	1,524	0,70	0,660	2,5	0,062	
0,30	1,372	0,75	0,611	3,0	0,0347	
0,35	1,233	0,80	0,565	3,5	0,0196	
0,40	1,114	0,85	0,524	4,0	0,0112	
				5,0	0,0037	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулин Ф. С., Муравьев И. М. Освоение и исследование нагнетательных скважин. М., Гостоптехиздат, 1963. 156 с.
2. Абрамов С. К. Методы подбора и расчета фильтров буровых скважин. — В кн.: Фильтры водозаборных скважин. М., 1952, с. 15—32.
3. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. М., Госстройиздат, 1955. 384 с.
4. Абрамов С. К., Семенов М. П., Чалищев А. М. Водозаборы подземных вод. М., Госстройиздат, 1956. 256 с.
5. Алексеев В. С., Тесля А. Г., Курманенко А. Д. Перспективы комплексного применения экспресс-опробования и расходомерии для оценки параметров водоносных горизонтов. — В кн.: Мат-лы двенадцатой конф. молодых ученых ВСЕГИНГЕО. М., 1970, с. 12—17.
6. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. М., Стройиздат, 1948. 226 с.
7. Архипов С. А. Четвертичный период в Западной Сибири. Новосибирск, «Наука», 1971. 329 с.
8. Бабушкин В. Д., Раевский С. П. Определение фильтрационной анизотропии водоносных пород опытной откачкой. — «Разведка и охрана недр», 1957, № 21, с. 49—51.
9. Бабушкин В. Д., Лебединская З. П., Леви Л. З. Прогноз водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. М., «Недра», 1972. 196 с.
10. Баренблат Г. Н., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., «Недра», 1972. 288 с.
11. Башкатов Д. Н., Володько И. Ф. Рекомендации по способам проходки и выбору оборудования для бурения скважин на воду. — В кн.: Вопр. применения соврем. техники в гидрогеологии и инж. геологии. М., 1963, с. 55—72.
12. Башкатов Д. Н., Тесля А. Г. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин на воду. М., «Недра», 1970. 144 с.
13. Белоусов В. В. Общая геотектоника. М.—Л., Госгеолиздат, 1948. 599 с.
14. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. М., Углетехиздат, 1951. 71 с.
15. Биндеман Н. Н. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, поливами и нагнетаниями. М., Углетехиздат, 1951. 52 с.
16. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1970. 215 с.

17. Блажков В. И. Вращательное бурение на воду в рыхлых отложениях. — «Гидротехника и мелиорация», 1967, № 9, с. 86—89.
18. Богородицкий К. Ф. Движение природных газированных вод в скважинах. — В кн.: Вопр. формирования подзем. вод и инж.-геол. свойства пород. М., 1955, с. 71—88. (Труды Лаб. гидрогеол. про лем им. Ф. П. Саваренского, т. 12).
19. Болдырев А. К. Опыт над фильтрацией горных пород *in situ* в связи с проектом водохранилища на р. Чу в Туркестане. — В кн.: Мат-лы по общ. и прикл. геологии. Вып. 27. Л., 1926, с. 1—60.
20. Бондаренко Н. Ф. О природе фильтрационных аномалий жидкостей. — «Докл. АН СССР», 1967, т. 177, № 2, с. 383—86.
21. Боровский Б. В., Самсонов В. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., «Недра», 1973. 304 с.
22. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М. «Недра», 1968. 328 с.
23. Бочевер Ф. М., Веригин И. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961. 199 с.
24. Бочевер Ф. М., Орадovская А. Е. К методике экспериментального определения параметров фильтрации в трещиноватых породах. — «Труды Координац. совещ. по гидротехнике», 1970, вып. 48, с. 71—84.
25. Бузинов С. Н., Умрихин И. Д. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М., «Недра», 1973. 248 с.
26. Бутырин П. Н. Лабораторные исследования известняков Черкейского ущелья на растворимость и выщелачивание. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. геол.-развед. ин-та», 1936, вып. 40, с. 135—155.
27. Бэр Я., Заславски А., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. Пер. с англ. М., «Мир», 1971. 446 с.
28. Васильев Г. А., Поленов И. К. Условия развития карстово-суффозионных форм в Кургузуйской бухте залива Кара-Богаз-Гол. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та геолургии», 1967, вып. 53, с. 76—83.
29. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962. 179 с.
30. Веригин Н. Н., Дзекцер Е. С. Определение фильтрационных параметров горных пород, залегающих в основании гидротехнических сооружений, методом нагнетания жидкости и газа. — «Труды Координац. совещ. по гидротехнике», 1970, вып. 4, с. 85—94.
31. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М., Госгостехиздат, 1962. 275 с. Авт.: Л. Бан, А. Ф. Богомолова, В. А. Максимова и др.
32. Володько И. Ф. Использование подземных вод для орошения и водоснабжения. М., Сельхозиздат, 1955. 321 с.
33. Володько И. Ф. К методике лабораторного изучения движения подземных вод в трещиноватых породах. — «Гидрогеология и инж. геология», 1941, № 8, с. 30—38.
34. Володько И. Ф. Современная техника при проведении откачек. — В кн.: Вопр. применения соврем. техники в гидрогеологии и инж. геологии. М., 1963, с. 5—54.
35. Выветривание и почвообразование. Т. 34. Под ред. Б. Б. Полюнова. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950. 211 с.
36. Гавич И. К. Определение параметров анизотропного пласта по данным опытных работ и моделирования в условиях неустановившегося

- движения. — «Труды Координац. совещ. по гидротехнике», 1970, вып. 48, с. 102—116.
37. Гвоздецкий Н. А. Проблемы изучения карста и практика. М., «Мысль», 1972. 392 с.
 38. Геология и плотины. Т. 1. Под ред. А. Н. Вознесенского. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 182 с.
 39. Гидравлический разрыв пласта. Баку, Азнефтеиздат, 1956. 168 с. Авт.: М. А. Абдуллаев, А. А. Великбеков, К. А. Карапетов, А. С. Меликбеков.
 40. Гиматудинов Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта. М., «Недра», 1971. 309 с.
 41. Гинзбург И. П. Движение газа в узкой щели. — «Вестн. Ленингр. ун-та. Механика», 1953, № 8, с. 27—50.
 42. Гинзбург-Карагичева Т. Л. Очерки микробиологии нефти. М.—Л., ОНТИ, 1936. 150 с.
 43. Гиринский Н. К. К расчету движения подземных вод к скважинам. — «Гидрогеология и инж. геология», 1947, № 9, с. 56—79.
 44. Гиринский Н. К. К расчету установившегося плоского движения двух потоков подземных вод со свободной поверхностью разной материализации. — «Докл. АН СССР», 1951, т. 80, с. 181—184.
 45. Гиринский Н. К. Определение коэффициентов фильтрации. М., Госгеолгиздат, 1950. 135 с.
 46. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., «Наука», 1965. 400 с.
 47. Гринбаум И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., «Недра», 1965. 187 с.
 48. Гуревич А. Е., Капченко О. Н., Кругликов Н. М. Теоретические основы нефтяной гидрогеологии. Л., «Недра», 1972. 271 с.
 49. Гуреев А. М. К вопросу о методике изучения трещиноватости скальных пород основания гидротехнических сооружений. — В кн.: Проблемы инж. геологии в строительстве. М., 1961, с. 65—87.
 50. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., «Недра», 1972. 365 с.
 51. Дружинин Н. И. К вопросу об определении дебита напорных скважин и колодцев методом ЭГДА. — «Изв. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидротехн.». 1950, т. 42, с. 82—92.
 52. Заборовский А. И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963. 423 с.
 53. Иванов А. А. Основы геологии и методика разведки и оценки месторождений минеральных солей. М., Госгеолгиздат, 1953. 202 с.
 54. Инженерно-геологические исследования для гидроэнергетического строительства (методическое руководство). Т. 1, 2. Под ред. И. В. Попова. М., Госгеолгиздат, 1950. 320 и 350 с. Авт.: Белый Л. Д., Бяндеман Н. Н., Дубровский В. В. и др.
 55. Инструкция и методические указания по определению водопроницаемости горных пород методом опытных нагнетаний в скважинах. Сост. Л. П. Колярова. Под ред. А. Г. Лыкошина, Е. С. Карпышева. М., «Энергия», 1968. 95 с.
 56. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. М., Госгеолгиздат, 1943. 248 с.
 57. Каменский Г. Н., Климентов П. П., Овчинников А. М. Гидрогеология месторождений полезных ископаемых. М., Госгеолгиздат, 1963. 355 с.

58. Керкис Е. Е. Влияние удельного веса подземных вод на условия их равновесия и движения. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1952, т. 27, вып. 2, с. 78—105.
59. Керкис Е. Е. Вопросы методики пробных и опытных откачек. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии», 1964, вып. 46, с. 262—275 с.
60. Керкис Е. Е. Инженерно-геологические исследования на р. Сулак в Северном Дагестане. — «Труды Центр. науч.-исслед. геол. развед. ин-та», 1936, вып. 40, с. 3—116.
61. Керкис Е. Е. К вопросу о движении подземных вод в трещиноватых породах. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1948, т. 22, с. 141—153.
62. Керкис Е. Е. Методика исследований глубоких скважин на Славянско-Троицком месторождении промышленных вод. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии», 1967, вып. 53, с. 112—128.
63. Керкис Е. Е. Методика определения статических и динамических уровней в глубоких буровых скважинах при газопроявлениях. — «Мат-лы Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та. Нов. сер.», 1956, вып. 18, гидрогеология, с. 169—183.
64. Керкис Е. Е. Методика опытных работ на фильтрацию в трещиноватых породах. — «Труды Центр. науч.-исслед. геол.-развед. ин-та», 1936, вып. 40, с. 117—135.
65. Керкис Е. Е. Определение водопроницаемости горных пород и притока воды к водозаборам при развитии турбулентного движения подземных вод. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1956, т. 32, вып. 2, с. 10—39.
66. Керкис Е. Е. Определение коэффициента водопроницаемости горных пород комбинированным методом откачки нагнетания. — «Сов. геология», 1956, № 56, с. 83—95.
67. Керкис Е. Е. Определение коэффициента водопроницаемости и радиуса влияния по данным опытных кустовых откачек методом наименьших квадратов. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1958, т. 34, вып. 2, с. 94—100.
68. Керкис Е. Е. Определение неустановившегося радиуса влияния при откачке из напорных водоносных горизонтов. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1962, т. 44, вып. 2, с. 51—55.
69. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. М., Углетехиздат, 1955. 100 с.
70. Керкис Е. Е. Ориентировочное определение коэффициента водопроницаемости трещиноватых пород по поглощению промывочной жидкости. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1958, т. 34, вып. 2, с. 80—93.
71. Керкис Е. Е. Удаление сточных вод методом закачки в глубокие поглощающие горизонты. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии», 1964, вып. 46, с. 229—237.
72. Климентов П. П., Кононов В. М. Динамика подземных вод. М., «Высшая школа», 1973. 440 с.
73. Климентов П. П., Сыроватко М. В. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых. Ч. 2. М., «Недра», 1966. 379 с.
74. Коваленко Н. П., Худяков А. Д. Определение основных физико-механических характеристик торфяных грунтов. Архангельск, 1971. 25 с.
75. Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947. 375 с.
76. Коломенский Н. В. Инженерная геология. Ч. 2. М., Госгеолтехиздат, 1956. 319 с.

77. К о л ь С. А. Графоаналитический метод определения коэффициента фильтрации горных пород по результатам откачки воды на фильтрационном участке и некоторые вопросы, связанные с его применением. — «Сб. Гидроэнергoproекта», 1941, вып. 9, изыскания, с. 24—44.
78. К о л ь С. А. Определение скорости фильтрации подруслового потока. — «Труды Гос. гидрогеол. ин-та», 1948, вып. 8 (62), с. 175—187.
79. К о м и с с а р о в С. В. Методы увеличения дебита буровых скважин на воду. М., Госгеолтехиздат, 1959. 95 с.
80. К о р о т к е в и ч Г. В. Соляной карст. Л., «Недра», 1970. 255 с.
81. К о с т я к о в А. Н., Ф а в о р и н Н. Н., А в е р ь я н о в С. Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1956. 447 с.
82. К р а с н о п о л ь с к и й А. А. Грунтовые и артезианские колодцы. — «Горный журн.», 1912, № 3—7.
83. К р а т к и й справочник по прострелочно-взрывным работам. Под ред. Н. Г. Григоряна. М., «Недра», 1970. 248 с.
84. К р и с т е а Н. Подземная гидравлика. Т. 1,2. Пер. с румын. М., 1961, 1962, Гостоптехиздат. 363 и 491 с.
85. К у л ь ч и ц к и й Л. И., Г о л ь д б е р г В. М. Влияние минерализации воды на фильтрационные свойства песчано-глинистых пород. — В кн.: Гидрогеол. вопр. подземного захоронения промстоков. Вып. 14. М., 1969, с. 6—22.
86. Л а н г е О. К. Гидрогеология. М., «Высш. школа», 1969. 367 с.
87. Л а н г е О. К., С у л т а н о в А. Н. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия Узбекистана. Т. 1. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1963, с. 94—138.
88. Л а п т е в Ф. Ф. Агрессивное действие воды на карбонатные породы, гипсы и бетон. М.—Л., ГОНТИ, 1939. 104 с. (Труды Спецгео., вып. 1).
89. Л а п ш и н П. С. Испытание пластов в процессе бурения. М., «Недра», 1974. 200 с.
90. Л а р и о н о в А. К., П р и к л о н с к и й В. А., А н а н ь е в В. Т. Лесовые породы СССР и их строительные свойства. М., Госгеолтехиздат, 1959. 367 с.
91. Л е й б е н з о н Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостехиздат, 1947. 244 с.
92. Л и с и ц ы н К. И. О деформации суглинистых грунтов в связи с вопросом об образовании степных блюдц. — В кн.: Мат-лы Сев.-Кавк. геол. треста. Вып. 1. Новочеркасск, 1932, с. 1—20.
93. Л о в л я С. А., Г о р б е н к о А. А., К а п л а н Б. Л. Торпедирование и перфорация скважин. М., Гостоптехиздат, 1959. 278 с.
94. Л о м и з е Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
95. Л ю ж о н М. Плотины и геология. Пер. с франц. Под ред. М. М. Гришнина, М. П. Семенова. М.—Л., ОНТИ, 1936. 115 с.
96. М а к с и м о в В. М. Торпедирование гидрогеологических скважин в целях увеличения их водообильности. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1952, т. 27, вып. 11, с. 247—262.
97. М а к с и м о в В. М. Гидрогеологические расчеты скважин в зоне действия взрыва. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1974, т. 67, вып. 2, с. 162—173.
98. М а к с и м о в В. М. Основы гидродинамических расчетов систем извлечения глубинного тепла Земли в районах мерзлой зоны литосферы. — В кн.: Труды Второй Междунар. конф. по мерзлотоведению. Вып. 5. Якутск, 1973, с. 35—44.

99. Максимович Г. А. Основы карстования. Т. 1. Пермь, Кн. изд-во 1963. 444 с.
100. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Пер. с англ. М.—Л., Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
101. Методика гидрогеологических исследований при инженерно-геологических изысканиях. М., 1970. 390 с. (Производство и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в строительстве Госстроя СССР).
102. Методическое руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям для мелиоративного строительства. Вып. 3. М., 1972. 131 с. (Союзводпроект).
103. Методы и организация общей комплексной геологической съемки. Под ред. И. И. Никшича. М., ГОНТИ НКТП СССР, 1938. 216 с.
104. Мозжухин П. В. Эксплуатация сооружений и оборудование законтурного заводнения нефтяных пластов. М., Гостоптехиздат, 1955. 166 с.
105. Мятнев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы. — «Изв. АН СССР», 1947, № 9, с. 1069—1088.
106. Намиот А. И., Бондарева М. М. Растворимость газов в воде под давлением. М., Гостоптехиздат, 1963. 145 с.
107. Нейштадт Л. И., Пирогов И. А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М., «Энергия», 1969. 246 с.
108. Нормальный ряд водоподъемного оборудования для производства опытных откачек при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. Под ред. Д. М. Хохловкина. М., 1955. 79 с. (Вессоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инж. геологии).
109. Овнатанов Г. Т. Вскрытие пласта и освоение скважин. М., Гостоптехиздат, 1959. 234 с.
110. Овнатов Г. Т. Вскрытие и обработка пласта (для трещиноватых пород). М., «Недра», 1964. 266 с.
111. Овчинников А. М. Общая гидрогеология. М., Госгеолтехиздат, 1955. 380 с.
112. Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста. М., Изд-во Моск. ун-та, 1957. 161 с.
113. Огильви Н. А. Электролитический метод определения скорости движения подземных вод. — «Бюл. науч.-техн. информ. МГ и ОН СССР», 1958, № 4 (16), с. 17—52.
114. Оркин К. Г., Кучинский П. К. Физика нефтяного пласта. М., Гостоптехиздат, 1955. 300 с.
115. Основы гидрогеологических расчетов. М. «Недра», 1969. 368 с. Авт.: Ф. М. Бочеввер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков.
116. Паукер Н. Г. О расчете коэффициента фильтрации, радиуса влияния и понижения пьезометрического уровня по данным групповой откачки из несовершенных скважин. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1955, т. 32, вып. 9, с. 88—103.
117. Петров А. И. Методы и техника измерений при промысловых исследованиях скважин. М., «Недра», 1972. 270 с.
118. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. Ч. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1968. 470 с.
119. Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод. М., «Недра», 1973. 296 с.
120. Плотников Н. И., Сыроватко М. В., Щеголов Д. И. Подземные воды рудных месторождений. М., Металлургия, 1957. 614 с.

121. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения. М., «Недра», 1968. 328 с.
122. Поленов И. К. Гидродинамические условия при откачках из водоносного горизонта, заключающего два слоя воды различного удельного веса. — «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии», 1964, вып. 46, с. 73—83.
123. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехтеоретиздат, 1952. 676 с.
124. Преображенский П. И. Соликамские калийные месторождения. М., Госхимтехиздат, 1933. 34 с.
125. Прохоров С. П., Качугин Е. П. Методическое руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям при разведке месторождений твердых полезных ископаемых. М., Госгеолтехиздат, 1955. 232 с.
126. Пыхачев Г. Б., Исаев Р. Т. Подземная гидравлика. М., «Недра», 1973. 200 с.
127. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. М., «Наука», 1968. 107 с.
128. Рац М. В. Структурные модели в инженерной геологии. М., «Недра», 1973. 214 с.
129. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1970. 160 с.
130. Резников А. А., Муликовская Е. П. Методы анализа природных вод. М., «Недра», 1970. 480 с.
131. Рельтов Б. В. Влияние физико-химических факторов на водопроницаемость и деформируемость связных грунтов. — В кн.: Труды совещ. по механике грунтов, основаниям и фундаментам. М., 1956, с. 60—75.
132. Роза С. А. Осадки гидротехнических сооружений на глинах с малой влажностью. — «Гидротехн. строительство», 1950, № 9, с. 25—30.
133. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1966. 283 с.
134. Саваренский Ф. П. Гидрогеология. Учеб. пособие для вузов. М.—Л., ОНТИ, 1935. 335 с.
135. Самсонов Б. Г. Об определении расчетных гидрогеологических параметров на основе совокупности частных значений. — «Разведка и охрана недр», 1969, № 2, с. 48—53.
136. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., «Недра», 1968. 380 с.
137. Силин-Бекчурин А. И. Метод приближенного расчета скорости фильтрации и подземного стока рассолов по пьезометрам. — «Труды лаб. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского», 1949, т. 2, с. 158—182.
138. Силин-Бекчурин А. И. Специальная гидрогеология. М., Госгеолиздат, 1961. 397 с.
139. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. Под ред. А. А. Маккаеева. М., «Недра», 1971. 216 с.
140. Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962. 321 с.
141. Сорокин А. А. Метод воздушного определения трещиноватости (ВОТ). — «Труды Ленгидропроекта», 1973, № 27 (14), с. 119—125.
142. Справочник геофизика. Т. 4 (сейсморазведка). М., «Недра», 1966. 752 с.
143. Справочник гидрогеолога. Под ред. М. Е. Альтовского. М., Госгеолтехиздат, 1968. 616 с.

144. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Под ред. В. М. Максимова. Л., «Недра», 1967. 592 с.
145. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 2. Под ред. В. М. Максимова. Там же. 359 с.
146. Суреньянц Я. С. Водяные скважины. М., 1964. 318 с.
147. Терцаги К. Инженерная геология. Пер. с нем. проф. Н. Ф. Погребова и др. М.—Л., Георазведиздат, 1932. 390 с.
148. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ (методические рекомендации). Под ред. В. М. Шестакова, Д. Н. Башкатова. Авт.: В. М. Шестаков, И. Ф. Володько, Д. Н. Башкатов и др. М., 1969. 185 с.
149. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. 5. Под ред. Б. М. Беркенгейма. М., Акц. о-во «Сов. энциклопедия», 1930. 476 с.
150. Устрицев О. Г. Исследование фильтрационных характеристик необводненных горных пород нагнетанием воздуха в скважины при инженерных изысканиях для гидротехнического строительства. М., Госстройиздат, 1972. 35 с.
151. Форхгеймер Ф. Гидравлика. Пер. с нем. и под ред. А. А. Черкасова. М.—Л., ОНТИ, 1935. 615 с.
152. Ханташ М. С. Анализ данных опытных откачек из скважин с перетеканием. — В кн.: Вопр. гидрогеол. расчетов. Под ред. Ф. М. Бочера, В. М. Шестакова. М., 1964, с. 27—43.
153. Хлебодаров Н. И., Поздеев Е. К., Тесля А. Г. Исследование водонсых горизонтов с помощью испытателей пластов. — В кн.: Мат-лы двенадцатой конф. молодых ученых ВСЕГИНГЕО. М., 1970, с. 17—22.
154. Хохловкин Д. М. Глубинные насосы для водопонижения и водоободнения. М., «Недра», 1971. 264 с.
155. Храмушев А. С. Гидрогеологическая классификация трещиноватости горных пород. — «Сов. геология», 1941, № 4, с. 85—94.
156. Храмушев А. С. Теоретические основы графо-аналитического метода определения коэффициента водопроводимости трещиноватых и грубообломочных пород. — В кн.: Гидрогеология и инж. геология. Сб. 8. М.—Л., 1941, с. 3—29.
157. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
158. Чернов Б. С., Базлов М. Н., Жуков А. И. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М., Гостоптехиздат, 1960. 317 с.
159. Шамшев Ф. А., Тараканов С. Н., Кудряшов Б. Р. Технология и техника разведочного бурения. М., «Недра», 1973. 495 с.
160. Шацов Н. И., Федоров В. С., Кулиев С. М. Бурение нефтяных и газовых скважин. М., Гостоптехиздат, 1961. 666 с.
161. Шейдеггер А. Е. Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостоптехиздат, 1960. 249 с.
162. Шестаков В. М. К теории фильтрации растворов в грунтах. — В кн.: Вопр. формирования хим. состава подземных вод М., 1963, с. 192—213.
163. Шестаков В. М. О кинетике сорбции на грунтах. — Темат. сб. ВСЕГИНГЕО, 1969, вып. 14, с. 23—34.
164. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М., Изд-во Моск. ун-та, 1973. 327 с.
165. Шестаков В. М., Башкатов Д. Н. Опытные-фильтрационные работы. М., «Недра», 1974. 204 с.

166. Ш и щ е н к о Р. И. Гидравлика глинистых растворов. Баку, Азнефтеиздат, 1951. 136 с.
167. Ш л я й ф е р т М. А., В о л ь н и ц к а я Э. М. Увеличение дебита водяных скважин взрывом. М., «Недра», 1970. 63 с.
168. Ш н е е б е л и Г. Использование воздуха для измерения проницаемости ненасыщенных аллювиальных отложений. — В кн.: *Вопр. гидрогеол. расчетов*. Под ред. Ф. М. Бочевера, В. М. Шестакова. М., 1964, с. 122—130.
169. Щ е г о л е в Д. И. Рудничные воды. Москва — Харьков, Углетехиздат, 1948. 144 с.
170. Щ е л к а ч е в В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959. 467 с.
171. Щ е л к а ч е в В. Н., Л а н у к Б. Б. Подземная гидравлика. М., Гостоптехиздат, 1949. 523 с.
172. Э з р о х и Л. Л. Метод расчета вязкости солевых растворов сложного состава. — *Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та*, 1953, вып. 27, с. 132—141.
173. Я н к е Е., Э м д е Ф. Таблицы функции с формулами и кривыми. М., Физматгиз, 1959. 420 с.
174. Я с а ш и н А. М., Я к о в л е в А. И. Испытание скважин. М., «Недра», 1973. 203 с.
175. C l o o s Н. Über Biegungbrüche und selective Zerlegung. — *Geol. Rundschau*. Bd 24, H 3, 4, 1933, S. 203—219.
176. D a u b r e e А. Études synthétiques de geologie experimentale. Paris, 1879. 828 p.
177. J a i s s o n J. Interpretation de essais de production de Tests de formation revue de l'Institute Français du Petrole. Vol. 12, № 11, 1957, p. 1123—1142.
178. O l s e n H a r o l d W. Darcys law in kaolinite. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1965, 46, № 1, p. 74.
179. Z a k А. Y., G r i f f i n Ph. Evaluating drill stem test data. — *Oil and Gas J.*, № 21, 1957, p. 125—128.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД	
Глава 1. Формирование фильтрационных свойств горных пород, их общая характеристика	6
§ 1.1. Проницаемость и пустотность	7
§ 1.2. Физико-геологические процессы, влияющие на проницаемость и пустотность	9
§ 1.3. Степень изменчивости фильтрационных свойств. Фильтрационная анизотропия	27
Глава 2. Фильтрационные свойства различных горных пород, приближенная оценка их по общим геологическим и гидро- геологическим данным	32
Фильтрационные свойства основных видов горных пород	—
§ 2.1. Обломочные нецементированные по- роды	34
§ 2.2. Пористые обломочные сцементирован- ные породы	41
§ 2.3. Слабопроницаемые породы, образу- ющие пласты, разделяющие водонос- ные горизонты	43
§ 2.4. Трещиноватые породы	—
§ 2.5. Проницаемость и пустотность закар- стованных и кавернозных пород	55
§ 2.6. Классификация горных пород по филь- трационным свойствам	61
Приближенная оценка фильтрационных свойств горных пород по общим геологическим и гидро- геологическим данным	—
§ 2.7. Данные комплексной геологической и гидрогеологической съемки, развед- очных работ и лабораторных опреде- лений	65

§ 2.8. Применение геофизических работ . . .	68
§ 2.9. Данные о водопритоках в различные выработки и производительности скважин	71
§ 2.10. Ориентировочная оценка фильтрационных свойств горных пород по аналогии с другими районами	73

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Глава 3. Основные законы фильтрации в однородной среде	76
Линейный закон фильтрации (закон Дарси)	—
§ 3.1. Различные виды формулы Дарси. Дифференциальные уравнения установившейся фильтрации	77
§ 3.2. Дифференциальное уравнение планового радиального потока подземных вод при перетоке из других горизонтов	81
§ 3.3. Линейный закон фильтрации для слабопроницаемых пород; начальный градиент	82
Нелинейные законы фильтрации	84
§ 3.4. Пределы применимости закона Дарси. Основные нелинейные зависимости	85
Неустановившееся движение подземных вод	91
§ 3.5. Дифференциальные уравнения	92
Глава 4. Фильтрационные параметры, их сущность и обоснование полевых методов определения для однородных пород	95
Пустотность и пористость горных пород. Параметры установившейся фильтрации	—
§ 4.1. Пустотность и пористость	—
§ 4.2. Коэффициенты проницаемости и фильтрации, зависимость их от величины и характера пустотности	96
§ 4.3. Обоснование зависимостей для определения коэффициента фильтрации или проницаемости по данным исследования одиночных скважин	98
§ 4.4. Обоснование зависимостей для определения фильтрационных параметров при наличии наблюдательных скважин и по данным взаимодействия скважин	105
Методы определения фильтрационных параметров при неустановившемся движении подземных вод	111
§ 4.5. Обоснование зависимостей для одиночных скважин	—
§ 4.6. Обоснование зависимостей для наблюдательных и группы взаимодействующих скважин	118
§ 4.7. Зона влияния скважины. Радиус депрессионной воронки	123

Глава 5. Обоснование главнейших методов изучения фильтрационных свойств неоднородных и анизотропных пород . . .	126
Слоистые толщи	—
§ 5.1. Изучение фильтрационных свойств слоистых толщ	128
Породы, неоднородные в плане	130
§ 5.2. Влияние плановой неоднородности на дебит скважин и распределение напоров при откачке	—
§ 5.3. Фильтрационная неоднородность и анизотропия трещиноватых и закарстованных пород	134
Глава 6. Основы методов определения коэффициента действительной скорости движения подземных вод, параметров квадратичного закона фильтрации и коэффициента связи . .	135
Обоснование зависимостей для определения коэффициента действительной скорости движения подземных вод	—
§ 6.1. Определение скорости посредством индикаторов	—
§ 6.2. Применение геофизических методов .	137
Методы определения фильтрационных параметров при переходе линейного закона фильтрации в квадратичный	139
§ 6.3. Фильтрационные параметры и зависимости для откачек и нагнетаний . .	—
§ 6.4. Зависимости для определения параметров	140
Методы определения коэффициента связи (параметра перетекания)	142
§ 6.5. Установившееся движение подземных вод	—
§ 6.6. Неустановившееся движение подземных вод	—
Глава 7. Основы специальных методов определения фильтрационных параметров	144
§ 7.1. Метод откачки—нагнетания	—
§ 7.2. Определение водопроницаемости неоднородных закарстованных и трещиноватых пород по данным наблюдений над естественными потоками подземных вод, питаемых за счет инфильтрации	145
§ 7.3. Методы расходомерии	146
§ 7.4. Определение скорости фильтрации по изменению концентрации индикатора в одной скважине (в зоне интенсивного водообмена).	148
§ 7.5. Методы определения фильтрационных параметров посредством испытателей пластов и опережающего опробования	—
§ 7.6. Основы методов определения фильтрационных параметров горных пород	—

в зоне аэрации и на границе ее с водоносной зоной	154
§ 7.7. Определение фильтрационных параметров по данным опытов нагнетания воздуха	153

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОД

Г л а в а 8. Виды опытных гидрогеологических работ, их объем, размещение и оборудование опытных скважин и кустов . .	158
Установление необходимого объема и видов опытных гидрогеологических работ и местоположения опытных скважин и кустов	—
§ 8.1. Виды опытных гидрогеологических работ, их назначение и результаты . .	—
§ 8.2. Рекомендации по установлению объема и методов опытных гидрогеологических работ, выбора местоположения опытных скважин или шурфов	159
Оборудование и подготовка скважин и других выработок для проведения опытных гидрогеологических работ	166
§ 8.3. Рекомендуемые способы бурения, оборудование и конструкция скважин для опытных гидрогеологических работ . .	—
§ 8.4. Рекомендуемые схемы опытных гидрогеологических кустов	171
§ 8.5. Подготовка буровых скважин к опытным гидрогеологическим работам . .	176
Г л а в а 9. Производство опытных гидрогеологических работ и их документация	179
Требования, предъявляемые к опытным работам . .	—
§ 9.1. Число и величина понижений (повышений) напора для различных видов опытных работ. Продолжительность опытов	—
§ 9.2. Документация опытных гидрогеологических работ	188
Дефекты и искажающие факторы при опытных гидрогеологических работах; способы их устранения	193
§ 9.3. Дефекты, вызванные неравномерностью хода опыта, неудовлетворительным состоянием фильтра и изменением проницаемости пород в приствальной зоне	—
§ 9.4. Особенности опытных гидрогеологических работ при переменной минерализации, большой газонасыщенности и высокой температуре подземных вод	195
Г л а в а 10. Рекомендации по прогнозу радиуса влияния крупных водозаборов	208

Глава 11. Определение расчетных значений основных фильтрационных параметров; степень их обоснованности и точности	210
§ 11.1. Определение расчетных значений основных фильтрационных параметров элементарными способами и статистическими методами	210
§ 11.2. Степень точности основных фильтрационных параметров; возможные и допустимые погрешности	212
Заключение	215
Приложения	216
Список литературы	218

ЕВГЕНИЙ ЕФИМОВИЧ КЕРКИС

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД**

Редактор издательства В. И. Невельштейн
Переплет художника И. М. Сенского
Техн. редактор А. Б. Яшуржинская
Корректор Р. С. Янбекова

Сдано в набор 28/IV 1975 г. Подписано в печать 7/VIII 1975 г.
М-31790. Формат 60 × 90^{1/16}. Бумага тип. № 2. Печ. л. 14^{1/2}.
Уч.-изд. л. 15,59. Тираж 8400 экз. Заказ № 244/273. Цена 94 коп.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171,
Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при
Государственном комитете Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 91.