Библиотека СОК

ВСЕСОЮЗНОЕ НАУЧНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ГОРНОЕ ОБЩЕСТВО

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ

В ПОМОЩЬ ВЕЛИКИМ СТРОЙКАМ КОММУНИЗМА

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Н. Н. БИНДЕМАН

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ОТКАЧКАМИ, НАЛИВАМИ И НАГНЕТАНИЯМИ

УГЛЕТЕХИЗДАТ
Москва 1951

АННОТАЦИЯ

В работе излагаются новые методы расчета водопроницаемости горных пород опытными откачками, наливами и нагнетаниями.

Работа является практическим руководством по определению коэффициентов фильтрации полевыми методами и рассчитана на широкие круги инженеров-геологов, производящих изыскания для гидротехнического строительства.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От гидрогеологической секции ВНИТОГОР	3
Введение	4
I. Опытные откачки из скважин	7
А. Откачки из совершенных скважин в однородных пластах.	8
1. Откачки из скважин, расположенных на значительном удалении от реки	9
а) В условиях напорных вод	—
б) В условиях безнапорных вод	10
2. Откачки из скважин, расположенных вблизи реки	15
Б. Откачки из несовершенных скважин в однородных пластах.	16
1. Методы вывода расчетных формул	—
2. Откачки из скважин, расположенных на значительном удалении от реки	20
а) В условиях напорных вод	—
б) В условиях безнапорных вод	22
3. Откачки из скважин, расположенных вблизи реки	26
4. Подрусловые откачки	28
В. Откачки из скважин в неоднородных пластах	29
Г. Неустановившееся движение грунтовых вод при опытных откачках	31
Д. Возможность нарушения ламинарного движения при откачках.	39
II. Опытные нагнетания и наливы в скважины	45
III. Определение коэффициента скорости фильтрации при откачках	47
IV. Опытные откачки из шурфов	48
Приложение	50
Литература	52

Редакционная коллегия

Семенов М. П. (председатель), Каменский Г. Н., Овчинников А. М., Приклонский В. А., Биндеман Н. Н., Золотарев Г. С.

ОТ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ ВНИТОГОР

В целях оказания научно-технической помощи инженерам-геологам, производящим изыскания для великих строек коммунизма, Гидрогеологическая секция Всесоюзного научного инженерно-технического горного общества организовала в Москве цикл лекций по методике гидрогеологических расчетов для гидротехнического строительства на следующие темы:

1. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации воды из водохранилищ.
2. Гидрогеологические расчеты фильтрации в основании и в обход плотин.
3. Гидрогеологические расчеты дренажей на участках, защищаемых от затопления и подтопления.
4. Гидрогеологические расчеты фильтрации из каналов и повышения уровня грунтовых вод на орошаемых площадях.
5. Гидрогеологические расчеты притока воды в котлованы и искусственного понижения грунтовых вод.
6. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами и нагнетаниями.
7. Гидродинамические основы прогноза режима грунтовых вод.

Для того чтобы инженеры-геологи, работающие в изыскательских экспедициях и партиях, могли непосредственно использовать материалы лекций в своей практической работе, лекции по каждой теме семинара публикуются в виде отдельных брошюр.

В настоящей работе излагается содержание лекций, прочитанных Н. Н. Биндеманом в мае 1951 г., по шестой теме семинара «Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами и нагнетаниями».

Горное общество с признательностью примет все отзывы и замечания по публикуемым работам. Отзывы следует направлять по адресу: Москва, проезд Владимирова, д. 6, комн. 11.

Председатель гидрогеологической секции ВНИТОГОР
М. П. СЕМЕНОВ

ВВЕДЕНИЕ

Определение водопроницаемости горных пород является одной из наиболее ответственных задач гидрогеологических исследований, производящихся для обоснования проектов гидротехнических сооружений.

Водопроницаемость горных пород характеризуется коэффициентом фильтрации, коэффициентом скорости движения воды в порах и трещинах и величиной удельного водопоглощения.

Коэффициент фильтрации K представляет собой скорость фильтрации при гидравлическом градиенте, равном единице.

По закону Дарси

$$K = \frac{V}{I} = \frac{Q}{FI}. \tag{1}$$

При градиенте $I = 1$

$$K = V = \frac{Q}{F}, \tag{2}$$

где V—скорость фильтрации;
Q—расход потока;
F—площадь поперечного сечения потока.

Следовательно, коэффициент фильтрации иначе можно определить как фильтрационный расход, отнесенный к единице площади поперечного сечения потока при градиенте, равном единице.

Коэффициент фильтрации горных пород используется для расчетов фильтрационных потерь из водохранилищ и каналов, расчетов противодавления в основании плотин (в случае неоднородности основания), расчетов притока воды в строительные котлованы и т. п.

Коэффициентом скорости фильтрации K_0 называется скорость движения воды в порах или трещинах породы при гидравлическом градиенте, равном единице.

$$K_0 = \frac{V}{P_0} = \frac{Q}{P_0 F}, \tag{3}$$

где P_0 — пористость (скважность) пород.

Таким образом, коэффициент скорости фильтрации есть расход подземного потока, отнесенный к единице площади поперечного сечения лишь пор и трещин в породе.

Из формул (2) и (3) следует, что

$$K_0 = \frac{K}{P_0}. \qquad (4)$$

Определение коэффициента скорости необходимо для суждения о возможности размыва или растворения скальных и полускальных пород и суффозии песчано-гравелистых пород.

Данная работа не является систематическим изложением методики опытных работ. В ней освещаются лишь некоторые основные вопросы методики расчетов, причем наибольшее внимание уделяется опытным откачкам из скважин, как наиболее надежному и распространенному методу оценки водопроницаемости пород.

Удельным водопоглощением q называется отношение расхода воды при опытных нагнетаниях в скважины к единице мощности опробуемого слоя при 1 *м* напора.

$$q = \frac{Q}{l_0 H_0}. \qquad (5)$$

где l_0—длина интервала нагнетания;

H_0—напор над статическим уровнем воды в скважине.

Удельное водопоглощение служит условной характеристикой степени трещиноватости скальных и полускальных пород и может явиться только косвенным показателем их водопроницаемости.

Методы определения водопроницаемости горных пород подразделяются на полевые и лабораторные. В составе гидрогеологических исследований лабораторные исследования имеют подчиненное значение (применяются для предварительной характеристики водопроницаемости песчаных и глинистых пород) и в данной работе не рассматриваются.

К полевым методам относятся откачки, наливы и нагнетания, производимые в скважинах и шурфах.

Краткая характеристика этих методов приводится в табл. 1.

Таблица 1

Виды опытных работ	Преимущества	Недостатки
Опытные откачки из скважин	Являются основным, наиболее точным методом определения коэффициента фильтрации водоносных пород. В сочетании с определением скорости фильтрации индикаторами позволяют вычислить коэффициент скорости фильтрации	При глубоком залегании уровня подземных вод и одновременно значительной водопроницаемости горных пород производство откачек сопряжено с техническими трудностями

Продолжение табл. 1

Виды опытных работ	Преимущества	Недостатки
Опытные наливы воды в скважины (при малых давлениях)	Позволяют в некоторых случаях дать характеристику водопроницаемости „сухих" горных пород; позволяют определить коэффициент фильтрации водоносных пород при глубоком залегании уровня подземных вод, заменяя здесь откачки	Требуют повышенной точности замеров уровня, которая не всегда может быть соблюдена в полевой производственной обстановке. Кроме того, в отдельных случаях, при наливах может происходить кальматация трещин и пор породы
Опытные нагнетания воды в скважины (при больших давлениях)	Позволяют дать приближенную характеристику водопроницаемости скальных пород по зонам в тех случаях, когда проведение откачек по тем или иным техническим причинам затруднительно	Возможность кальматации трещин и пор породы. При больших напорах не исключается возможность возникновения турбулентного движения, что затрудняет использование полученных данных для расчетов
Откачки из шурфов	Позволяют определить коэффициент фильтрации пород при движении воды в породе в направлении, близком к вертикальному (при поступлении воды через дно).	Малое заглубление шурфов в водоносный пласт ограничивает область, характеризуемую откачкой, зоной, непосредственно примыкающей к шурфу
Наливы воды в шурфы	Позволяют ориентировочно определить коэффициент фильтрации пород (преимущественно суглинисто-супесчаных), залегающих выше уровня грунтовых вод	Условность суждения о коэффициенте фильтрации породы на основе явления насыщения породы водой

I. ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ ИЗ СКВАЖИН

Опытные откачки из скважин представляют собой относительно дорогой и трудоемкий вид исследований, поэтому выбор точек заложения опытных скважин и их глубины следует производить, имея в своем распоряжении не только достаточный гидрогеологический материал, полученный разведочными работами, но и ориентировочные данные о водопроницаемости пород на основе других, менее трудоемких, методов исследования. К таким методам относятся: для песчаных пород — лабораторные исследования коэффициентов фильтрации, для трещиноватых скальных пород — опытные нагнетания.

По лабораторным определениям коэффициентов фильтрации и опытным нагнетаниям можно построить приближенную эпюру изменения водопроницаемости по глубине. Это дает возможность установить целесообразность применения опытных откачек для определения коэффициентов фильтрации на том или ином участке вообще, а в случае целесообразности решить вопрос о методе откачки и расчетной схеме (местоположение и длина фильтра, расстояния до наблюдательных скважин и т. п.).

Для того чтобы опытные откачки были произведены с максимальной целеустремленностью, полезно, используя имеющиеся данные лабораторных работ и опытных нагнетаний, произвести предварительные фильтрационные расчеты. Если эти расчеты покажут, например, что порядок величины фильтрационных потерь заведомо, при всех самых невыгодных допущениях, незначителен по сравнению с приходной частью баланса водохранилища, то получение данных о среднем значении коэффициента фильтрации не представляет интереса. Вместе с тем для того же случая, если основание неоднородно, требуется внимательное изучение водопроницаемости пород путем опытных откачек.

При опытных откачках определяются расход (дебит) и понижение уровня воды, в функциональной зависимости от которых находится коэффициент фильтрации.

При выборе расчетных схем для определения коэффициента фильтрации необходимо учитывать следующие факторы:

1) степень однородности пласта;

2) длину водоприемной части скважины по отношению к мощности водоносного пласта;

3) гидравлическое состояние подземных вод (напорные и безнапорные воды);

4) граничные условия в области питания и дренирования водоносного пласта;

5) длительность опытной откачки;

6) гидравлический режим потока (ламинарный и турбулентный режимы).

Различают откачки из одиночных скважин («одиночные» откачки) и кустовые.

При кустовых откачках положение депрессионной кривой устанавливается по наблюдательным скважинам, закладываемым по одному или нескольким лучам. Благодаря этому кустовые откачки имеют ряд существенных преимуществ перед одиночными, главнейшими из которых являются следующие:

1) При обработке результатов кустовых откачек исключается необходимость использования величины радиуса депрессии, которая может быть определена лишь очень условно.

2) Наличие наблюдательных скважин дает возможность более уверенно определять момент, когда движение воды становится практически установившимся.

3) Расчет по наблюдательным скважинам позволяет не учитывать сопротивление фильтра.

4) В сильно трещиноватых породах в зоне, окружающей скважину, из которой производится откачка, может возникнуть турбулентный режим, в то время как на некотором удалении, где расположены наблюдательные скважины, сохраняется ламинарное движение.

5) При наличии нескольких лучей наблюдательных скважин имеется возможность дать оценку фильтрационной неоднородности пласта в горизонтальном направлении.

6) При кустовых откачках возможно производство опытов для определения коэффициента скорости фильтрации.

А. ОТКАЧКИ ИЗ СОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН В ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Откачки из совершенных скважин применяются в тех случаях, когда требуется определить усредненное значение коэффициента фильтрации в водоносных пластах небольшой мощности.

Прнменение таких откачек в рыхлых породах, требующих крепления, лимитируется обычно длиной фильтра (установка фильтров длиной более 10—15 *м* затруднительна по техническим причинам).

1. Откачки из скважин, расположенных на значительном удалении от реки

а) В условиях напорных вод

При откачке из совершенной скважины, вскрывшей напорные воды, имеет место наиболее простая схема движения. Если пьезометрическая поверхность до откачки была горизонтальной, причем водоносный горизонт имел неограниченное распространение, то линии токов при откачке являются прямыми и в плане и в разрезе, а эквипотенциальные поверхности — цилиндрическими поверхностями (рис. 1).

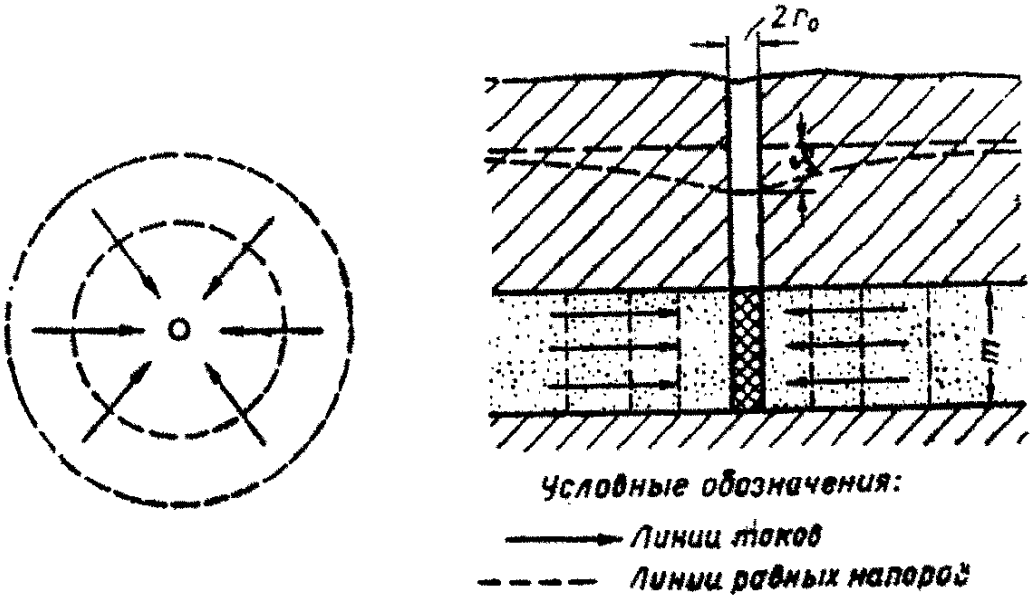


Рис. 1

Скорость течения воды по вертикали в любой точке равна нулю. В этих условиях задача определения коэффициента фильтрации имеет точное гидромеханическое решение (формула Дюпюи для напорных вод).

При откачке из одиночной скважины:

$$K = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi m S_0}, \qquad (6)$$

где Q — дебит скважины;
R — радиус воронки депрессии;
r_0 — радиус водоприемной трубы скважины[1];
m — мощность водоносного пласта;
S_0 — понижение уровня воды в скважине при откачке.

[1] В дальнейшем для краткости будем называть водоприемную часть скважины фильтром.

При кустовой откачке, по центральной и наблюдательной скважинам:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi m (S_0 - S_1)} \qquad (7)$$

или по двум наблюдательным скважинам:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi m (S_1 - S_2)}, \qquad (8)$$

где r_1 — расстояние от центральной скважины до первой наблюдательной;

r_2 — то же, до второй (дальней) наблюдательной скважины;

S_1 — понижение уровня воды в первой наблюдательной скважине;

S_2 — то же, во второй наблюдательной скважине.

б) В условиях безнапорных вод

Если подземные воды имеют свободную поверхность (безнапорные воды), то движение воды к скважине носит более сложный характер, чем в напорных водах. Линии токов в этом случае являются прямыми только в плане, но не в разрезе, где они по мере приближения к скважине все более искривляются. Соответственно с этим и поверхности равного напора, к которым перпендикулярны линии токов, также искривлены (рис. 2).

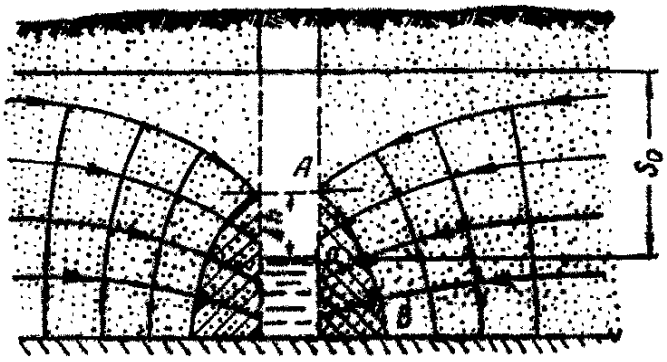


Рис. 2

В формулах Дюпюи не учтено это искривление изопотенциальных поверхностей и условно принято, что они являются цилиндрическими.

В соответствии с этим формулы приобретают следующий вид (рис. 3):

при откачке из одиночной скважины

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{\pi S_0 (2H - S_0)}, \qquad (9)$$

где H — мощность водоносного пласта до откачки.

Если производится кустовая откачка, то при наличии одной наблюдательной скважины:

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right)}{\pi (S_0 - S_1)(2H - S_0 - S_1)}; \qquad (10)$$

при двух наблюдательных скважинах:

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{\pi (S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}. \qquad (11)$$

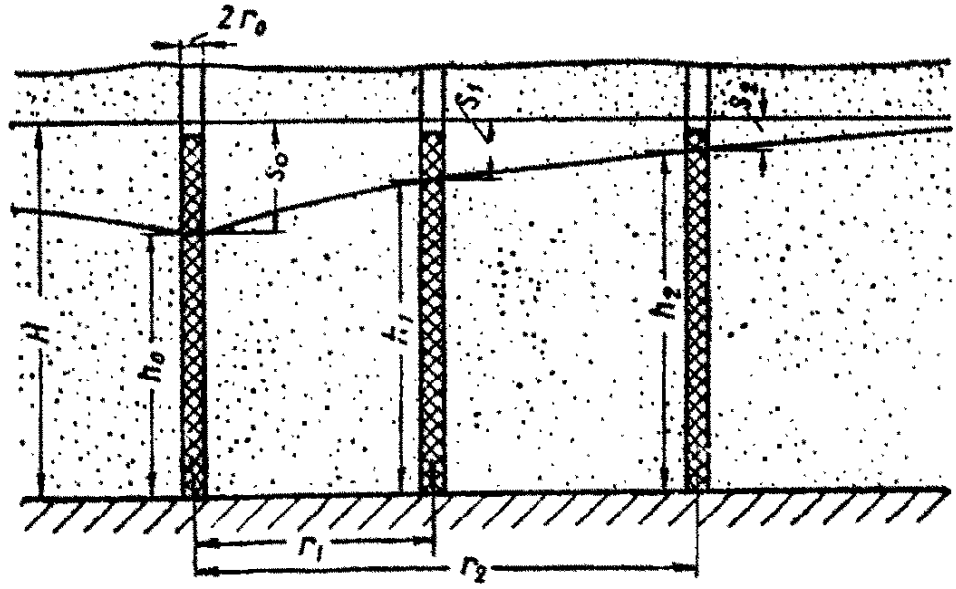


Рис. 3

При откачке из скважин в условиях безнапорных вод всегда наблюдается явление так называемого «скачка» или «прыжка», заключающееся в том, что уровень воды, располагается в скважине ниже, чем непосредственно за фильтром. Этот скачок обусловлен сопротивлениями, возникающими при движении грунтовых вод в породе, прилегающей к скважине (так называемое явление «высачивания воды»), а также при прохождении через фильтр.

Схема скачка очень наглядно охарактеризована проф. Г. Н. Каменским: «Если провести из точки пересечения кривой депрессии со стенками колодца поверхность равного напора, то вероятный вид последней (рис. 2) в разрезе представится кривой линией AB, отклоняющейся в верхней части от колодца под углом, соответствующим углу падения депрессионной кривой, а в нижней — приближающейся к вертикальной линии. На этой линии пьезометрический напор будет во всех точках одинаковым, равным высоте уровня грунтовой воды у конечной точки A кривой депрессии. Если бы на этой же высоте стоял и уровень

воды в колодце, тогда бы вода, заключенная на участке грунта между поверхностью $A—B$ и стенками колодца, не могла бы двигаться, так как, чтобы это движение совершалось, необходимо некоторое падение напора Aa, которое может развиться лишь за счет прыжка Δh [1].»

В связи с разрывом уровня у скважины, некоторые гидрогеологи рекомендуют определять коэффициент фильтрации, замеряя величину S_0 по затрубной скважине, что является неправильным и влечет за собой значительную ошибку при определении коэффициента фильтрации в сторону его завышения.

Это объясняется тем обстоятельством, что поверхность равного напора, примыкающая к скважине в точке A (рис. 2), больше боковой поверхности фильтра, на которую делится расход в формуле Дюпюи. Поэтому велнчины скорости и коэффициента фильтрацин при расчетах получаются преувеличенными. Правда, принимая в расчет уровень воды в скважине, преуменьшение поверхности еще значительнее, однако оно компенсируется тем, что берется бо́льшее понижение уровня, и тем самым как бы увеличивается градиент потока.

Анализируя гидромеханические сетки движения, образующиеся при откачке, проф. Н. К. Гиринский показал, что расчет коэффициента фильтрации по формуле (9), выполненный по данным об уровне воды в скважине, из которой производится откачка, является достаточно точным даже при осушении скважины до дна (т. е. при $S_0 = H$), между тем, как расчет по уровню воды в затрубной скважине дает ошибку до 50%.

Формулы Дюпюи выведены из условия, что пьезометрическая поверхность напорных вод или свободная поверхность безнапориых вод до откачки представляет собой горизонтальную плоскость.

Исходя из такой предпосылки, принимается, что при откачке воронка депрессии симметрична в любом вертикальном сечении, проходящем через скважину, а контур питания представляет собой окружность радиусом R.

Подобной схеме в природе отвечают условия, когда скважина, из которой производится откачка, расположена в центре острова круглой формы, т. е. берется случай частный и довольно редкий.

Обычно в природных условиях имеет место движение подземных вод из области питаиия к области дренирования. В этом случае при откачке из скважины образуется асимметричная депрессия, которая при достаточно большой продолжительности откачки распространяется до области питания (рис. 4). Ниже по потоку при известиых условиях депрессия замыкается и в некотором удалении от скважины располагается водораздельная

---

[1] Г. Н. Каменский, «Основы динамики подземных вод» Госгеолиздат, М., 1943.

точка A, разделяющая поток на два направления: к скважине и к зоне дренирования.

Ширина полосы депрессии тем больше, чем больше понижение уровня воды в скважине при откачке и чем меньше уклон подземного потока.

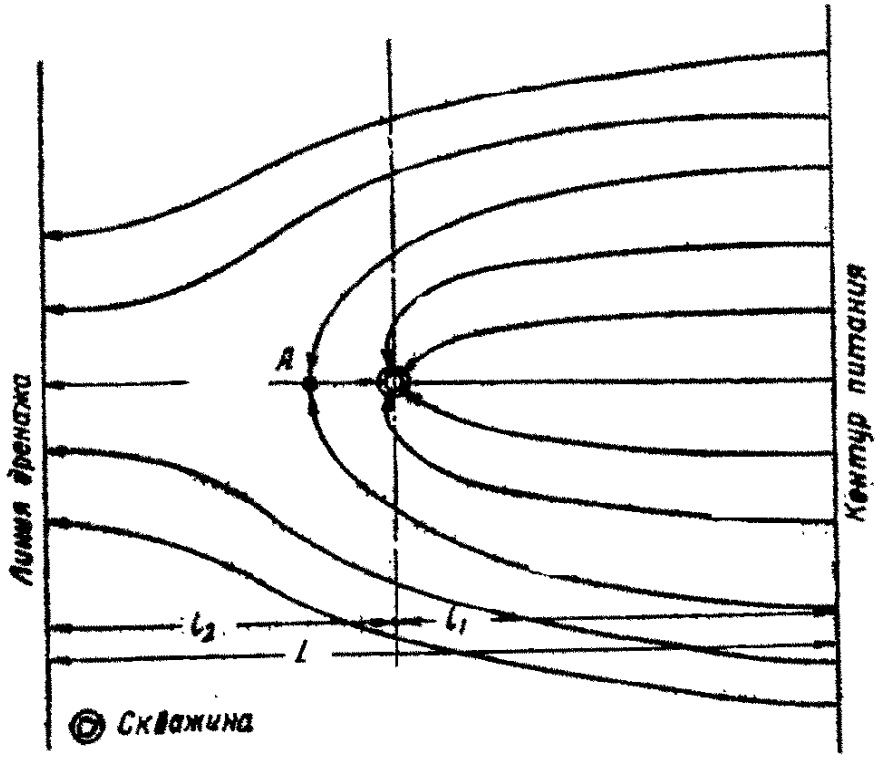


Рис. 4

Границы потока в области питания и дренажа в плане в самой общей схеме можно считать прямыми линиями, параллельными друг другу, равно как и гидроизогипсы (или гидроизопьезы) до производства откачки.

Для указанной схемы А. В. Романовым в Институте ВОДГЕО выведены следующие формулы для определения коэффициента фильтрации по данным откачек из одиночных скважин:

а) для напорных вод

$$K = \frac{Q \ln \left[\frac{2}{\pi} \frac{L}{r_0} \cos \frac{\pi (l_1 - l_2)}{2L} \right]}{2\pi m S_0}; \qquad (12)$$

б) для безнапорных вод

$$K = \frac{Q \ln \left[\frac{2}{\pi} \frac{L}{r_0} \cos \frac{\pi (l_1 - l_2)}{2L} \right]}{\pi S_0 (2H - S_0)}, \qquad (13)$$

где L — расстояние между контурами питания и дренажа (рис. 4);

l_1 — расстояние от скважины до контура питания;

l_2 — то же, до линии дренажа;

S_0 — понижение уровня воды в скважине при откачке;

r_0 — радиус скважины.

В случае значительного удаления участка расположения скважины от областей питания и дренирования, можно принять $l_1 \approx l_2 \approx R$ и $L = 2R$.

Тогда формулы (12) и (13) принимают следующий вид:

а) для напорных вод

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{R}{r_0} \right)}{2\pi m S_0}; \qquad (14)$$

б) для безнапорных вод

$$K = \frac{Q \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{R}{r_0} \right)}{\pi S_0 (2H - S_0)}. \qquad (15)$$

Сопоставляя формулы Романова с формулами Дюпюи (6) и (9) мы видим, что, при удаленности контуров питания и стока, они однотипны по структуре и отличаются лишь по коэффициенту при отношении $\frac{R}{r_0}$ (под знаком логарифма).

Для кустовых откачек в напорных водах при значительном удалении от контуров питания и стока формулы Романова принимают следующий вид:

$$K = \frac{Q}{4\pi m S_1} \ln \left(\frac{1 + \cos \frac{\pi r_1}{2R}}{1 - \cos \frac{\pi r_1}{2R}} \right), \qquad (16)$$

причем значение R определяется путем подбора по следующей формуле:

$$S_1 = \frac{S_0}{2 (\ln 4R - \ln \pi r_0)} \ln \left(\frac{1 + \cos \frac{\pi r_1}{2R}}{1 - \cos \frac{\pi r_1}{2R}} \right). \qquad (17)$$

В формулах (16) и (17):

S_0 — понижение уровня воды в центральной скважине;

S_1 — то же, в наблюдательной скважине (от статического уровня в этой скважине).

Следует отметить, что формулы Романова точнее отражают природную гидрогеологическую обстановку, нежели формулы, выведенные из условия кругового контура питания.

2. Откачки из скважин, расположенных вблизи реки

При откачке из одиночной скважины, расположенной вблизи реки, коэффициент фильтрации следует определять по формулам (12) и (13).

При кустовых откачках следует пользоваться формулами, предложенными В. Д. Бабушкиным (Институт ВОДГЕО), приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Тип откачки		Формула для определения коэффициента фильтрации
Луч направлен параллельно реке	По одной наблюдательной скважине	$K = \frac{Q}{A} ln \frac{\sqrt{4a^2 + r_1^2}}{r_1}$ (18)
	По двум наблюдательным скважинам	$K = \frac{Q}{A}\left(\frac{1}{2} ln \frac{4a^2+r_1^2}{4a^2+r_2^2} + ln \frac{r_2}{r_1}\right)$ (19)
Луч направлен перпендикулярно реке	По одной наблюдательной скважине	$K = \frac{Q}{A} ln \frac{L_1 + a}{\lvert L_1 - a\rvert}$ (20)
	По двум наблюдательным скважинам	$K = \frac{Q}{A}\left(ln \frac{L_1+a}{\lvert L_1-a\rvert} - ln \frac{L_2+a}{\lvert L_2-a\rvert}\right)$ (21)

В формулах (18—21):

a — расстояние центральной скважины от реки.

Если луч направлен к реке, то $L_1 = a - r_1$; $L_2 = a - r_2$.

При этом в расчет вводятся абсолютные значения $|L_1 - a$ и $|L_2 - a|$. Когда луч направлен от реки, то $L_1 = a + r_1$ и $L_2 = a + r_2$.

Значения величины A в зависимости от гидравлического состояния подземных вод (напорные и безнапорные воды) принимается по табл. 3.

Таблица 3

Условия расчета	Гидравлическое состояние подземных вод	
	напорные воды	безнапорные воды
По одной наблюдательной скважине	$A = 2\pi m S_1$	$A = \pi S_1 (2H - S_1)$
По двум наблюдательным скважинам	$A = 2\pi m (S_1 - S_2)$	$A = \pi(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)$

Б. ОТКАЧКИ ИЗ НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН В ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Откачки из несовершенных скважин применяются при значительной мощности водоносного пласта.

Если при откачках из совершенных скважин, как мы указывали, вертикальные составляющие скорости фильтрации либо отсутствуют (напорные воды), либо имеют небольшое значение (безнапорные воды), то при откачке из несовершенных скважин они приобретают уже существенное значение, и тем бо́льшее, чем короче фильтр скважины относительно мощности водоносного пласта.

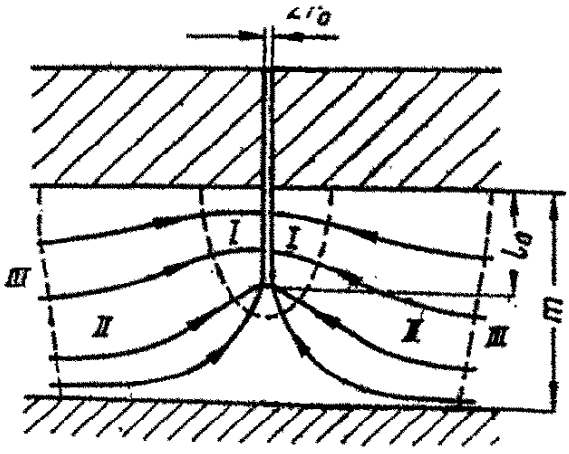


Рис. 5

Схема притока воды к несовершенной скважине в условиях напорных, а также безнапорных вод вообще является довольно сложной. В ближайшей к скважине зоне (зона *I*, рис. 5) линии тока испытывают наибольшие деформации и направлены как снизу, так и с боков. Размеры этой зоны невелики. По экспериментальным данным она простирается примерно на 1,0—1,5 l_0 (l_0 — длина фильтра) от скважины, из которой производится откачка.

Далее следует зона *II* — переходная. Наконец, на расстоянии около 1,0—1,5 m (m — мощность слоя) от скважины подземный поток приближается уже к плоско-радиальному, и для расчетов коэффициента фильтрации в этой части можно пользоваться формулами, приведенными выше для совершенных скважин, учитывая всю мощность слоя.

1. Методы вывода расчетных формул

Известные в настоящее время методы и приемы решения задачи по определению коэффициента фильтрации для несовершенных скважин ограничиваются рассмотрением первой из указанных зон — ближайшей к скважине.

Для напорных вод применительно к этой зоне имеются приближенные гидромеханические решения, основанные на теории линейных стоков.

Ввиду того, что применение теории линейных стоков мало знакомо широким кругам гидрогеологов, мы сочли полезным привести вывод формулы для функции распределения напоров при откачке из скважины в водоносном пласте неограниченной мощности.

Под линейным стоком понимается линия в водоносном пласте, к которой направлен весь фильтрационный поток. Если поток направлен к точке, то сток называется точечным. Для последнего, расположенного в безграничном водоносном пласте, скорость потока в заданной точке A водоносного пласта выражается (рис. 6)

$$V = \frac{Q}{4\pi\rho^2},$$

где ρ — расстояние между стоком и точкой, в которой определяется скорость;

Q — дебит стока.

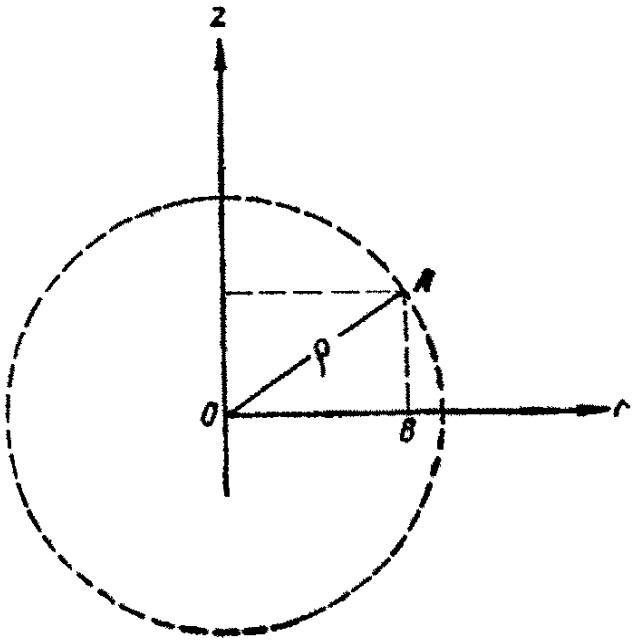


Рис. 6

На основании закона Дарси можно написать

$$V = -K\frac{dS}{d\rho},$$

где dS — элементарная величина потери напора на элементарном отрезке пути $d\rho$.

Из указанных выражений следует:

$$dS = -\frac{Q\cdot d\rho}{4\pi K\rho^2}$$

Интегрируя это выражение

$$\int_0^S dS = -\frac{Q}{4\pi K}\int_R^\rho \frac{d\rho}{\rho^2},$$

где R — радиус контура питания, получаем:

$$S = \frac{Q}{4\pi K}\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right).$$

При $R \to \infty$

$$S = \frac{Q}{4\pi K\rho} \qquad (22)$$

В системе цилиндрических координат (из треугольника OAB) можно написать:

$$\rho = \sqrt{r^2 + z^2}.$$

Подставляя это выражение в формулу (22), окончательно получим выражение функции понижения напора для точечного стока в безграничном водоносном пласте:

$$S = \frac{Q}{4\pi K\sqrt{r^2 + z^2}}. \qquad (23)$$

Переходим к выводу аналогичной формулы для линейного стока, расположенного в безграничном водоносном пласте. Обозначим длину стока $2l$, а расход потока, притекающего к стоку Q. Начало координат поместим в середине линейного стока (рис. 7).

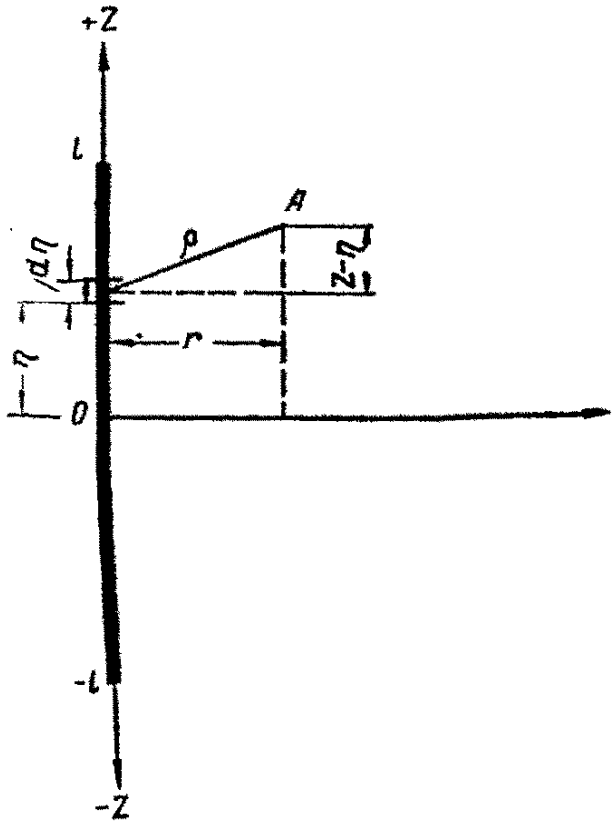


Рис. 7

Выделим на линейном стоке элементарный участок $d\eta$, расположенный на расстоянии η от начала координат. Далее допустим, что интенсивность притока вдоль линейного стока равномерна (это допущение, разумеется, несколько условно, так как на концевых участках приток больше, чем в середине линии). При этом допущении производительность элементарного участка стока выражается:

$$dQ = \frac{Q}{2l} \cdot d\eta. \qquad (24)$$

Понижение напора, создаваемое элементарным участком линейного стока в любой точке A водоносного пласта, находящейся в расстоянии ρ от элементарного участка, равно

$$dS = \frac{dQ}{4\pi K\rho}. \qquad (25)$$

Расстояние ρ может быть выражено через координаты r, z точки A следующим образом:

$$\rho = \sqrt{r^2 + (z - \eta)^2}. \qquad (26)$$

Подставив в выражение (25) значения dQ по формуле (24) и ρ по формуле (26), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$dS = \frac{d\eta}{8\pi Kl\sqrt{r^2 + (z - \eta)^2}}. \qquad (27)$$

Для определения функции понижения напоров для всего линейного стока интегрируем выражение (27) в интервале от l до минус l.

$$\int_0^S dS = \frac{Q}{8\pi Kl}\int_{-l}^{l}\frac{d\eta}{\sqrt{r^2+(z-\eta)^2}}.$$

Интегрирование дает:

$$S = \frac{Q}{8\pi Kl}\left(\operatorname{arsh}\frac{z+l}{r} - \operatorname{arsh}\frac{z-l}{r}\right), \qquad (28)$$

где arsh — обозначение гиперболического арсинуса.

Определение arsh производится по таблице (см. приложение).

По этой формуле, зная по данным наблюдательной скважины понижение уровня воды при откачке в любой точке пласта и дебит скважины, можно определить коэффициент фильтрации пласта.

При помещении фильтра наблюдательной скважины на уровне середины фильтра центральной скважины можно принять $z = 0$. Обозначив далее расстояние до наблюдательной скважины $r = r_1$ и понижение уровня в ней $S = S_1$, получим следующее выражение коэффициента фильтрации:

$$K = \frac{Q}{4\pi lS_1}\operatorname{arsh}\frac{l}{r_1}. \qquad (29)$$

Напоминаем, что при выводе этой формулы величиной l являлась половина длины фильтра скважины. Обозначив полную длину фильтра $l_0 = 2l$, получим

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\operatorname{arsh}\frac{l_0}{2r_1}. \qquad (30)$$

Так как при значительной длине фильтра по сравнению с радиусом скважины $\operatorname{arsh}\frac{l_0}{2r_1} \approx \ln\frac{2l_0}{2r_1}$, то формула (30) может быть записана в следующем виде:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\ln\frac{l_0}{r_1}. \qquad (31)$$

При выводе формул для определения коэффициента фильтрации по данным откачек из несовершенных скважин **в безнапорных водах** часто пользуются следующим приемом. Подземный поток в зоне влияния скважины условно разделяется горизонтальной плоскостью, проходящей через середину фильтра, на две части. Эта плоскость принимается за плоскость тока, в силу чего оказывается возможным рассматривать верхнюю часть скважины как совершенную и находящуюся в условиях

безнапорных вод, и нижнюю — как несовершенную в напорных водах. Для каждой части отдельно по соответствующим формулам рассчитывается расход. Эти расходы затем суммируются, и из полученного выражения определяется коэффициент фильтрации.

Для кустовых откачек из несовершенных скважин в безнапорных водах Н. К. Гиринский предложил пользоваться теми же формулами, что и для напорных вод, вводя в них среднюю величину мощности потоков в пределах водоприемной части скважины, по следующим соотношениям:

для центральной и первой наблюдательных скважин

$$l' = l_0 - \frac{S_0 + S_2}{2}; \qquad (32)$$

для первой и второй наблюдательных скважин

$$l'' = l_0 - \frac{S_1 + S_2}{2}, \qquad (33)$$

где l_0 — длина фильтра от статического уровня.

С помощью указаниых методов выведен ряд формул для определения коэффициентов фильтрации. Ниже приводятся преимущественно лишь те из них, которые могут найти применение при изысканиях для гидротехнического строительства.

2. Откачки из скважин, расположенных на значительном удалении от реки

а) В условиях напорных вод

Приведем формулы для расчета коэффициента фильтрации применительно к случаю, когда фильтр скважины примыкает к водоупорной кровле пласта, и длина фильтра составляет не более 25—30% мощности водоносного пласта ($l_0 < 0{,}3\ m$). При откачке из одиночной скважины:

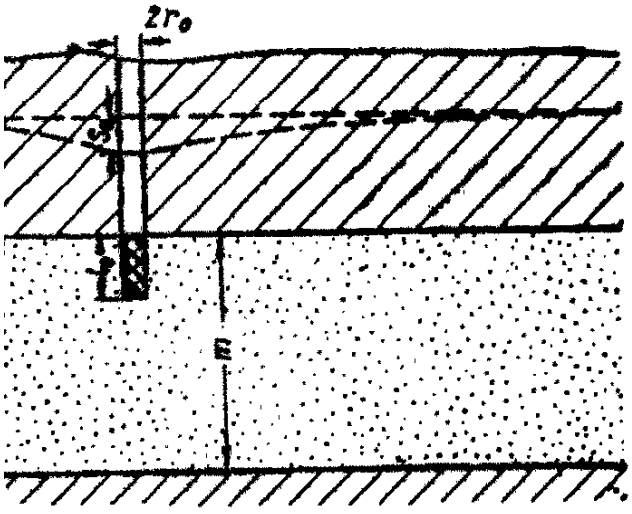


Рис. 8

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_0} \ln \frac{\alpha l_0}{r_0}, \qquad (34)$$

где S_0 — понижение уровня воды в скважине (рис. 8);

r_0 — радиус фильтра скважин;

α — коэффициент перехода от эквипотенциальной поверхности у скважины к фильтру скважины. Значения α зависят от метода приведения цилиндрической поверхности фильтра скважины к эллиптической эквипотен-

циальной поверхности. По Гиринскому $\alpha = 1{,}60$, по Бабушкину $\alpha = 1{,}32$. Ввиду того, что эта величина входит в формулу под логарифмом, выбор ее значения мало отражается на определяемую величину коэффициента фильтрации.

Для кустовых откачек в тех же условиях (короткий фильтр, примыкающий к водоупорной кровле), при расчете по одной наблюдательной скважине, следует пользоваться формулой (31).

При расчете по двум наблюдательным скважинам формулой (35)

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 (S_1 - S_2)} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_2} \right), \qquad (35)$$

где S_1 — понижение уровня воды в первой наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии r_1 от центральной (рис. 9);

S_2 — то же, во второй наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии r_2 от центральной.

Фильтры наблюдательных скважин должны примыкать к водоупорной кровле и иметь длину, не большую, чем длина фильтра центральной скважины (l_0). Расстояние до наблюдательных скважин не должно превышать 25% мощности водоносного пласта.

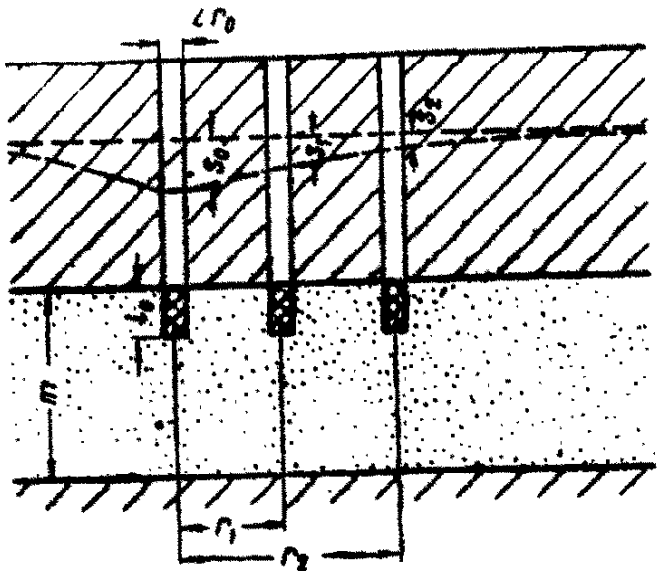


Рис. 9

Если мощность водоносного пласта значительна и желательно получить фильтрационную характеристику породы на глубину более 25 - 30% мощности пласта ($l_0 > 0{,}3m$), то расчет коэффициента фильтрации может быть сделан по формуле (36)

$$K = 0{,}366 \frac{Q}{mS_0} \left[\frac{1}{2\bar{h}} \left(2\lg \frac{4m}{r_0} - A \right) - \lg \frac{4m}{R} \right], \qquad (36)$$

где m — мощность водоносного пласта;

R — радиус питания;

$\bar{h} = \frac{l_0}{m}$;

A — безразмерная величина, определяемая по графику, как функция $\bar{h}$ (рис. 10).

Расчет коэффициента фильтрации при кустовых откачках в тех же условиях (фильтр относительно большой длины) может производиться по приближенной формуле В. М. Насберга

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 (S_1 - S_2)} \left[\operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_2} - \frac{l_0}{m} \left(\operatorname{arsh} \frac{m}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{m}{r_2} \right) + \frac{l_0}{m} \ln \frac{r_2}{r_1} \right]. \quad (37)$$

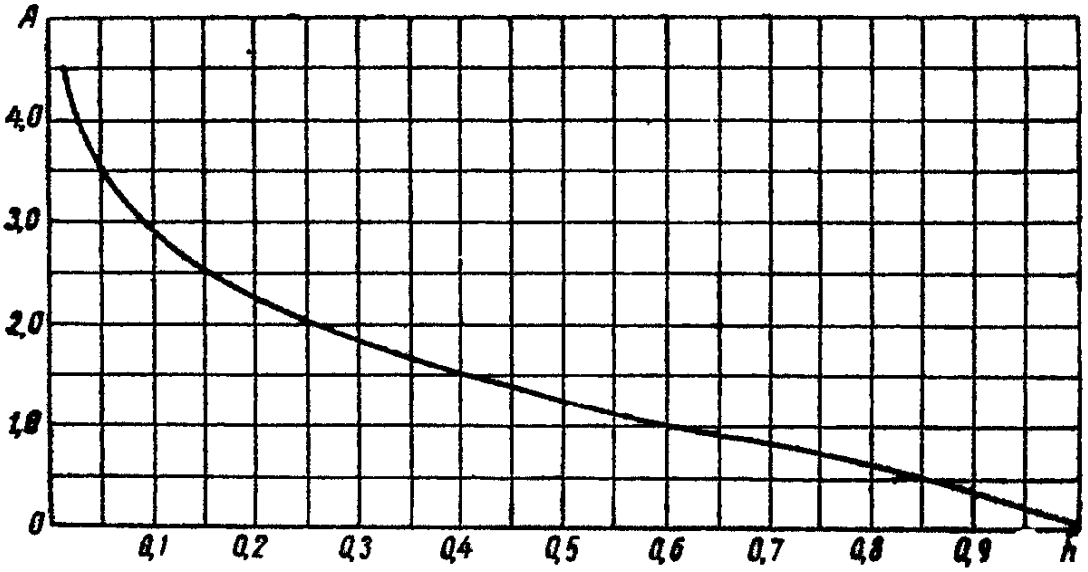


Рис. 10

Если в формуле (37) принять $m =$ [illegible], то она переходит в формулу (35), если же в ней положить $l_0 = m$, то в формулу совершенной скважины (8). Таким образом формула (37) является обобщающей.

б) В условиях безнапорных вод

Следует различать откачки из безнапорных вод при незатопленном фильтре (динамический уровень воды в скважине

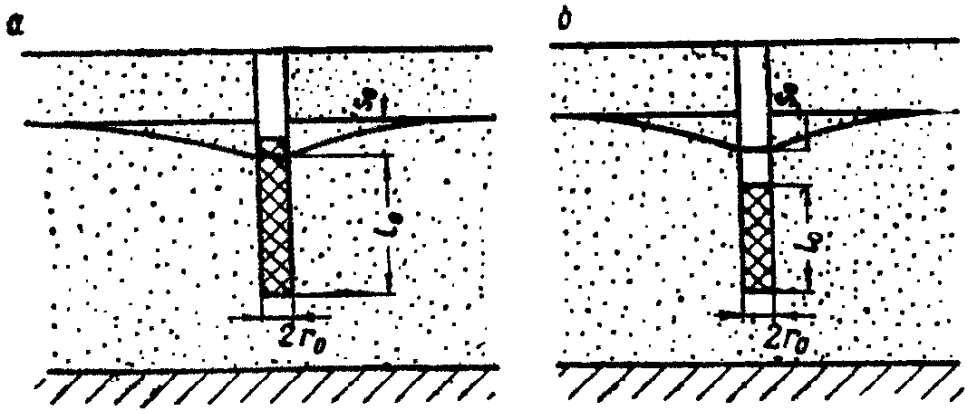


Рис. 11

располагается в пределах фильтра (рис. 11, *а*) и затопленном фильтре, когда верхний конец последнего находится ниже динамического уровня (рис. 11, *б*).

Откачки при незатопленном фильтре. При длине фильтра, не превышающей 30% мощности водоносного пласта ($l_0 < 0{,}3H$), расчет коэффициента фильтрации по данным одиночной откачки можно производить по приближенной формуле Бабушкина:

$$K = \frac{0{,}732\,\dfrac{Q}{S_0}}{\dfrac{l_0 + S_0}{\lg\dfrac{R}{r_0}} + \dfrac{l_0}{\lg\dfrac{0{,}66l_0}{r_0}}}. \qquad (38)$$

В тех же условиях при кустовых откачках следует пользоваться формулами (31) и (35), данными для напорных вод, сделав в последнюю подстановки по выражениям (32) и (33).

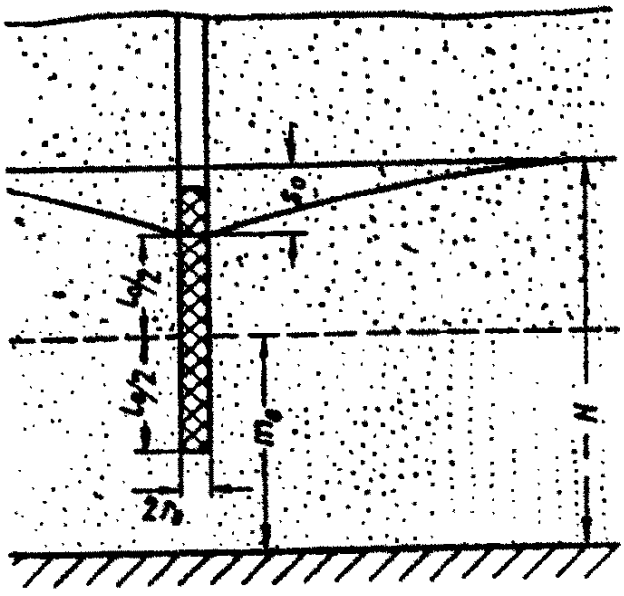


Рис. 12

Фильтры наблюдательных скважин при кустовых откачках с незатопленным фильтром должны располагаться в верхней части слоя и иметь длину не бо́льшую, чем фильтр центральной скважины.

При значительной длине незатопленного фильтра ($l_0 > 0{,}3H$) можно пользоваться следующими формулами Бабушкина (Институт ВОДГЕО).

При откачке из одиночной скважины:

$$K = \frac{0{,}732Q}{S_0\left[\dfrac{l_0 + S_0}{\lg\dfrac{l_0}{r_0}} + \dfrac{2m_0}{\dfrac{m_0}{2l_0}\left(2\lg\dfrac{4m_0}{r_0} - A\right) - \lg\dfrac{4m_0}{R}}\right]}. \qquad (39)$$

где m_0 — расстояние от середины фильтра центральной скважины до подошвы водоносного пласта (рис. 12);

A — определяется по графику (рис. 10), на котором в этом случае $\bar{h} = \dfrac{l_0}{m_0}$.

В тех же условиях при кустовых откачках:

$$K = \frac{Q}{\pi (S_1 - S_2)\left[\frac{2h_{ср}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{l_0}{r_2} - \frac{l_0}{m_0}\left(\operatorname{arsh} \frac{m_0}{r_1} - \operatorname{arsh} \frac{m_0}{r_2}\right) + \frac{l_0}{m_0} \ln \frac{r_2}{r_1}\right]}, \quad (40)$$

где $h_{ср} = \frac{h_1 + h_2}{2}$, причем h_1 и h_2 — превышения уровней воды в наблюдательных скважинах над плоскостью, проходящей через середину рабочей части фильтра.

Откачки при затопленном фильтре. Определение коэффициента фильтрации при откачках из одиночных скважин производится по следующим формулам Бабушкина (Институт ВОДГЕО).

При небольшом расстоянии основания фильтра от статического уровня воды в скважине (основание фильтра не достигает середины водоносного пласта (рис. 13)

$$K = 0{,}183 \frac{Q}{l_0 S_0}\left(B - 2\lg \frac{r_0}{C}\right), \quad (41)$$

где C — расстояние от статического уровня воды до верхнего конца фильтра;

B — безразмерная величина, определяемая по графику (рис. 14) в зависимости от значения дроби $\frac{C + l_0}{C}$.

При длине фильтра, превышающей половину мощности водоносного пласта, формула для расчета коэффициента фильтрации имеет следующий вид:

$$K = 0{,}366 \frac{Q}{S_0}\left(\frac{1}{Б + Д}\right), \quad (42)$$

где

$$Б = \frac{h_1}{\frac{1}{2h_1}\left(2\lg \frac{4h_1}{r_0} - A_1\right) - \lg \frac{4h_1}{R}}, \quad (43)$$

$$Д = \frac{h_2}{\frac{1}{2h_2}\left(2\lg \frac{4h_2}{r_0} - A_2\right) - \lg \frac{4h_2}{R}}, \quad (44)$$

где h_1 — расстояние от середины фильтра до статического уровня;

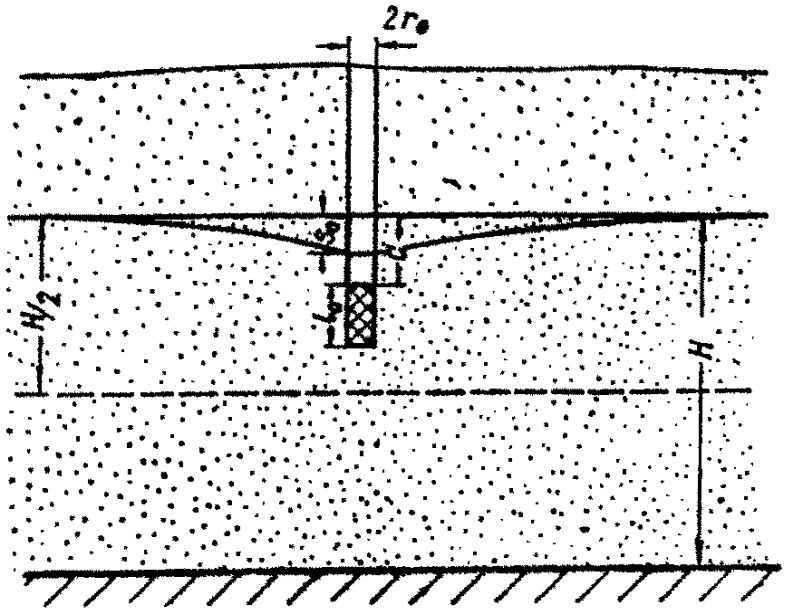

2r₀
s
H/2
H

Рис. 13

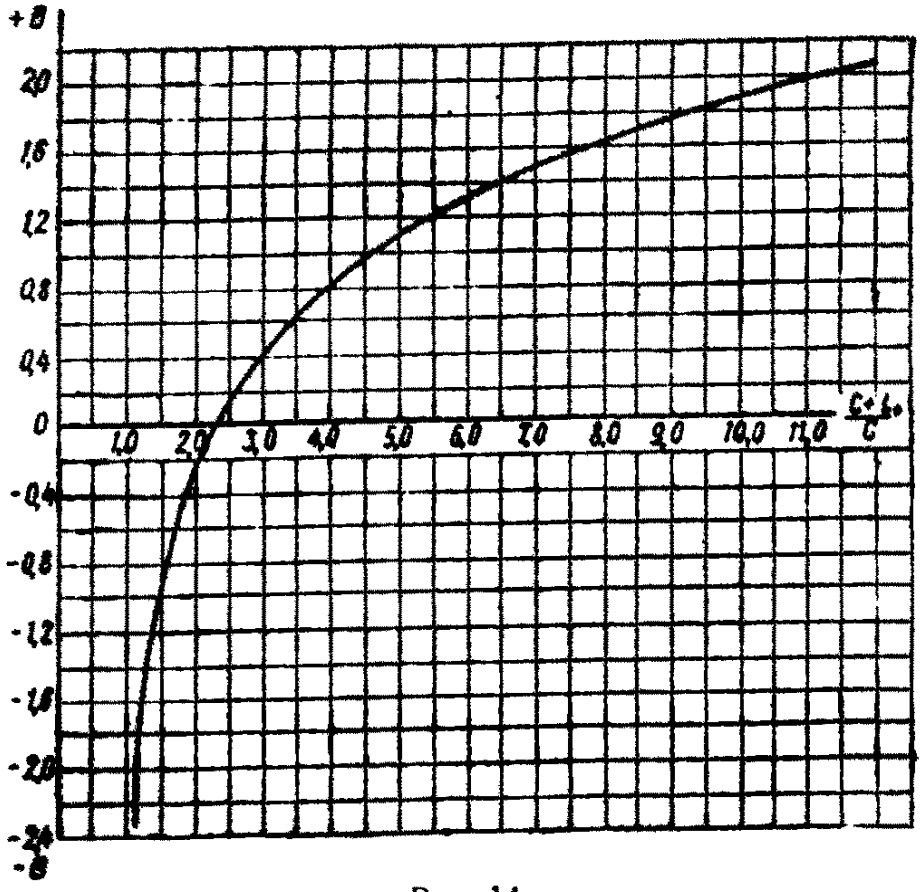

+B
2,0
1,6
1,2
0,8
0,4
0
-0,4
-0,8
-1,2
-1,6
-2,0
-2,4
-B
1,0
2,0
3,0
4,0
5,0
6,0
7,0
8,0
9,0
10,0
11,0
S+s₀/C

Рис. 14

h_2 — расстояние от середины фильтра до подошвы водоносного пласта;

A_1 и A_2 — безразмерные величины, зависящие соответственно от отношений $\bar{h}_1 = \frac{0{,}5\,l_0}{h_1}$ и $\bar{h}_2 = \frac{0{,}5\,l_0}{h_2}$, определяемые по графику (рис. 10).

Приведем пример расчета по формуле (42).

Дано: $l_0 = 6$ *м*; середина фильтра располагается в расстоянии $h_1 = 4$ *м* от статического уровня и $h_2 = 6$ *м* от водоупорного ложа; $S_0 = 2$ *м*; $Q = 350$ *м*^{3}/*сутки*; $r_0 = 0{,}1$ *м*; $R = 150$ *м*.
Определяем:

$$\bar{h}_1 = \frac{0{,}5 \cdot 6}{4} = 0{,}75; \quad \bar{h}_2 = \frac{0{,}5 \cdot 6}{6} = 0{,}5.$$

По графику (рис. 10) находим, что значению $h_1 = 0{,}75$ соответствует $A = 0{,}70$; значению $\bar{h}_2 = 0{,}5$ отвечает $A_2 = 1{,}25$.
Находим значения величин *Б* и *Д*:

$$Б = \frac{4}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}75}\left(2\lg\frac{4 \cdot 4}{0{,}1} - 0.70\right) - \lg\frac{4 \cdot 4}{150}} = 1{,}16,$$

$$Д = \frac{6}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}5}\left(2\lg\frac{4 \cdot 6}{0{,}1} - 1{,}25\right) - \lg\frac{4 \cdot 6}{150}} = 1{,}39.$$

Сделав соответствующие подстановки в формулу (42), получим

$$K = 0{,}366\frac{350}{2}\left(\frac{1}{1{,}16} + \frac{1}{1{,}39}\right) = 24\ м/сутки.$$

При кустовых откачках и расположении фильтра в верхней части водоносного пласта следует пользоваться формулой (35), а при длине фильтра более половины мощности пласта формулой (37).

3. Откачки из скважин, расположенных вблизи реки

При одиночных откачках из напорных вод, когда длина фильтра скважины не превышает 25—30% мощности пласта ($l_0 < 0{,}3m$)

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_0}\left(\ln\frac{1{,}32 l_0}{r_0} - 0{,}5\,\mathrm{arsh}\,\frac{0{,}88 l_0}{a}\right) \qquad (45)$$

где a — расстояние от скважины до реки.

---

[1] Формулы (45)—(50) предложены Бабушкиным (Институт ВОДГЕО).

Формула (45) применима при условии, если

$$\frac{a}{m} < 2 \text{ и } \frac{l_0}{m} < 0{,}3 \text{ (рис. 15).}$$

При кустовых откачках в таких же условиях:
а) если наблюдательная скважина расположена в луче, направленном параллельно реке:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh}\frac{l_0}{b}\right), \qquad (46)$$

где S_1 — понижение уровня в наблюдательной скважине

$$b = \sqrt{4a^2 + r_1^2};$$

б) при расположении наблюдательной скважины в луче, направленном нормально к берегу:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\left(\operatorname{arsh}\frac{l_0}{(L_1 - a)} - \operatorname{arsh}\frac{l_0}{L_1 + a}\right). \qquad (47)$$

Если луч ориентирован от центральной скважины к реке, то $L_1 = a - r_1$, причем величина $L_1 - a$ отрицательная и в расчет вводится абсолютное значение $(L_1 - a)$; при луче, направленном от реки $L_1 = a + r_1$.

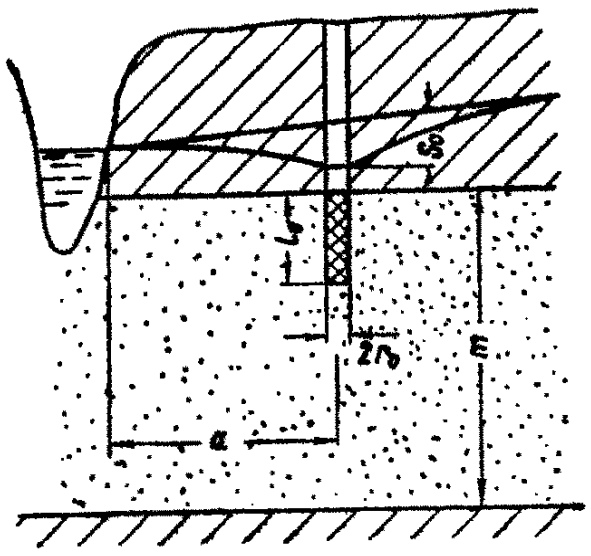


Рис. 15

При относительно небольшой мощности водоносного пласта и заложении фильтра на глубину, превышающую 25—30% мощности ($l_0 > 0{,}3m$), расчет коэффициента фильтрации можно производить по следующим формулам.

Для одиночных откачек:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_0}\left(\ln\frac{1{,}32 l_0}{r_0} + \frac{l_0}{2m}\ln\frac{a^2}{0{,}56 l_0^2}\right). \qquad (48)$$

Формула (48) действительна, когда $a > 0{,}5m$.

Для кустовых откачек в аналогичных условиях:
а) если наблюдательная скважина расположена в луче, направленном параллельно реке, то:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\left[\operatorname{arsh}\frac{l_0}{r_1} - \operatorname{arsh}\frac{l_0}{b} + \frac{l_0}{m}\left(\ln\frac{b}{r_1} + \operatorname{arsh}\frac{m}{b} - \operatorname{arsh}\frac{m}{r_1}\right)\right]. \qquad (49)$$

б) при расположении наблюдательной скважины по лучу, перпендикулярному к берегу реки, следует применять формулу:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_1}\left[\operatorname{arsh}\frac{l_0}{|L_1 - a|} - \operatorname{arsh}\frac{l_0}{L_1 + a} + \frac{l_0}{m}\left(\operatorname{arsh}\frac{L_1 + a}{L_1 - a} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \operatorname{arsh}\frac{m}{|L_1 - a|} + \operatorname{arsh}\frac{m}{L_1 + a}\right)\right|. \qquad (50)$$

Формулы (49) и (50) являются более общим выражением формул (46) и (47), в которые они переходят, если положить мощность водоносного пласта $m = \infty$. Обозначения в них те же.

В условиях безнапорных вод вблизи реки можно с некоторым приближением пользоваться приведенными формулами для напорных вод.

При этом откачки должны производиться при затопленном фильтре с погружением верхнего конца последнего на глубину, превышающую в 2—3 раза величину понижения уровня при откачке.

Вопрос о ширине зоны, в пределах которой следует учитывать влияние реки вообще еще недостаточно разобран. По-видимому, этим влиянием можно пренебрегать при удалении скважины на расстояние более 1—2 мощностей водоносного пласта.

4. Подрусловые откачки

При изысканиях для обоснования проектов плотин во многих случаях имеет большое значение определение коэффициента фильтрации пород, залегающих под руслом реки. В этих целях можно произвести откачки из подрусловых скважин, причем коэффициент фильтрации определяется по формуле:

$$K = \frac{Q}{2\pi l_0 S_0} \ln \frac{0{,}66 l_0}{r_0}. \qquad (51)$$

По исследованиям Бабушкина, произведенным в Институте ВОДГЕО, при этом должны быть соблюдены следующие условия:

а) фильтр располагается в верхней половине исследуемого пласта;

б) должно соблюдаться условие, при котором влияние реки практически исключается:

$$C > \frac{l_0}{\ln \frac{l_0}{r_0}}, \qquad (52)$$

где C — расстояние верхнего конца фильтра от дна реки.

При обычно применяемых в практике изысканий длинах и диаметрах фильтров величина C не превосходит 2,0—3,0 *м*.

В. ОТКАЧКИ ИЗ СКВАЖИН В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Наиболее характерными типами неоднородности пласта являются следующие:

а) Пласт состоит из многочисленных слоев небольшой мощности (мелкослоистый пласт).

б) Пласт сложен несколькими слоями значительной мощности (крупнослоистый пласт).

в) Пласт состоит из двух слоев, резко отличающихся по водопроницаемости (двуслойная схема).

При мелкослоистом строении пласта движение воды в относительно более проницаемых слоях можно рассматривать как напорное. Для расчета коэффициентов фильтрации здесь следует пользоваться формулами (6), (7) и (8), причем эти формулы можно применять не только для совершенных скважин, но и для несовершенных. В последнем случае величиной мощности водоносного пласта m следует считать длину фильтра скважины. При кустовых откачках длина фильтров наблюдательных скважин должна быть равна длине фильтра центральной скважины.

Если пласт имеет крупнослоистое сложение, то можно определить коэффициенты фильтрации отдельных слоев, производя откачки из скважин, фильтры которых установлены в середине слоев. Концы фильтра должны отстоять от кровли и подошвы слоя на расстоянии, не меньшем $^1/_3$ мощности слоя. Расчет по данным одиночной откачки производится по формуле (51), при наличии одной наблюдательной скважины — по формуле (30), при двух наблюдательных скважинах — по формуле (53)

$$K \quad \frac{Q}{2\pi l_0 (s_1 - s_2)} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_0}{2r_1} \quad \operatorname{arsh} \frac{l_0}{2r_2} \right). \qquad (53)$$

В природных условиях весьма распространено двуслойное строение пласта, причем нижний слой обладает значительно большей водопроницаемостью по сравнению с верхним. Такой характер геологического строения особенно типичен для аллювиальных отложений, слагающих поймы речных долин и надпойменные террасы.

Применительно к двуслойной схеме строения пласта Гиринским выведена формула дебита одиночной скважины. Вывод формулы сделан при следующих допущениях:

а) над относительно слабопроницаемым слоем располагается слой воды или столь сильно проницаемый пласт, что при откачке уровень воды в нем остается постоянным (рис. 16);

б) соотношение коэффициентов фильтрации исследуемых пластов не менее 10;

в) в более проницаемом слое, из которого производится откачка, движение воды совершается по горизонтальному направлению;

г) в менее проницаемом пласте движение совершается сверху вниз в подстилающий пласт, который при этом является как бы пластовой дреной.

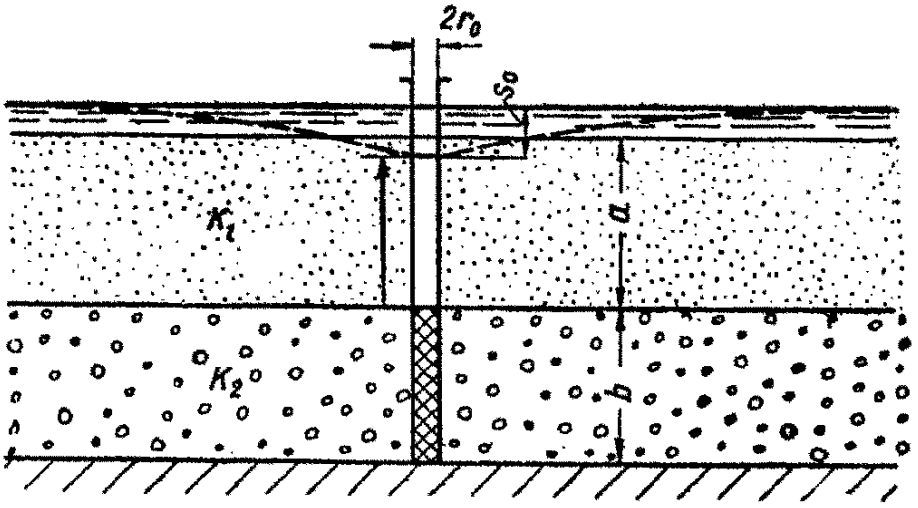


Рис. 16

Формула Гиринского имеет следующий вид:

$$Q = \frac{2{,}72 \cdot K_2 S_0 b}{\lg\left(\frac{1{,}12\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}\,ab}{r_0}\right)}, \qquad (54)$$

где K_1 — коэффициент верхнего (слабопроницаемого) пласта, имеющего мощность a;

K_2 — коэффициент фильтрации нижнего (сильно проницаемого) пласта, имеющего мощность b.

Формула (54) содержит два неизвестных K_1 и K_2, поэтому одно из них должно быть определено независимо. Так, например, в одном из слоев должна быть произведена опытная откачка из несовершенной скважины по методике, изложенной выше для опробования отдельных слоев неоднородной толщи.

В некоторых случаях для ориентировочной характеристики верхнего слоя можно также пользоваться лабораторными определениями коэффициента фильтрации.

Приведем пример расчета по формуле (54).

Определить коэффициент фильтрации гравелистого песка, залегающего на водоупорном ложе и имеющего мощность $b = 4{,}5$ *м*.

На гравелистом песке лежит слой мелкозернистого песка мощностью $a = 7$ *м*, а еще выше поверхность земли заболочена протекающим по близости ручьем.

Коэффициент фильтрации мелкозернистого песка по данным лабораторных определений $K_1 = 3$ *м/сутки.*

Откачка производилась из скважины диаметром 150 *мм* ($r_0 = 0{,}075$ *м*). Дебит скважины при понижении $S_0 = 0{,}55$ *м*, был 2,6 *л/сек* = 225 *м*³/*сутки.*

Подставляем значения величин в формулу (54)

$$225 = \frac{2{,}72 \times K_2 \times 0{,}55 \times 4{,}5}{\lg\left(\frac{1{,}12\sqrt{\frac{K_2}{3{,}0}} \times 7 \times 4{,}5}{0{,}075}\right)};$$

$$33{,}1 = \frac{K_2}{1{,}685 + 0{,}5 \lg K_2}.$$

Значение K_2 определяется подбором:

при $K_2 = 50$ — правая часть выражения равна 19,4, т. е. $< 33{,}1$;
„ $K_2 = 75$ — правая часть выражения равна 27,7, т. е. $< 33{,}1$.
„ $K_2 = 100$ — правая часть выражения равна 37,1, т. е. $> 33{,}1$;

Следовательно, значение K_2 лежит в интервале 75—100 *м/сутки.*

По графику (рис. 17) находим:

$K_2 = 89{,}5$ *м/сутки.*

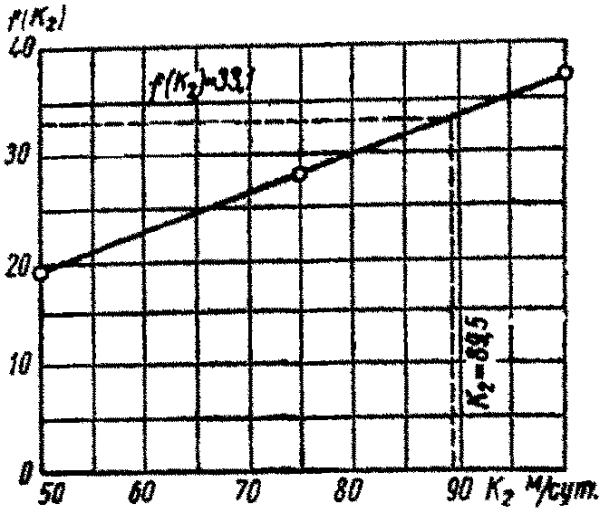


Рис. 17

Г. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ ОПЫТНЫХ ОТКАЧКАХ

Формулы для определения коэффициентов фильтрации по данным опытных откачек, рассмотренные в предыдущих разделах, выведены на основе уравнений установившегося течения подземных вод. С теоретической точки зрения установившееся состояние потока следует рассматривать как некоторый предел, который достигается только при $t = \infty$, да и то только в том случае если граничные условия и величина питания водоносного пласта неизменны во времени. Поскольку подобного рода абстрактные условия в природе не могут иметь места, то всегда движение воды в скважине, строго говоря, является в той или иной степени неустановившимся. Однако через некоторое время изменения характеристик потока (уровней воды и расхода) ста-

новятся столь малыми, что этими изменениями можно пренебречь и рассматривать движение как практически установившееся.

При откачках из напорных вод достиженне этого условно стационарного состояния происходит во много раз быстрее, чем при откачках из безнапорных вод, что объясняется принципиальным различием неустановившегося течения воды в условиях напорных и безнапорных вод.

Если представить себе водоносный пласт, кровля и подошва которого являются вполне водоупорными ($K = 0$) и пренебречь упругим режимом жидкости (т. е. в данном случае способностью воды подвергаться деформациям растяжения), то депрессия пьезометрической поверхности напорных вод в сфере влияния откачек должна была бы сформироваться практически мгновенно. Однако в реальных гидрогеологических условиях нет пластов абсолютно водонепроницаемых; происходящее при откачке понижение напора в водоносном пласте вызывает в той или иной мере поступление воды из кровли и подошвы в водоносный пласт замедляет развитие пьезометрической кривой. В том же направлении действует упругий режим. Но при опытных откачках, производимых в целях определения коэффициентов фильтрации, как правило, с малыми понижениями, влияние этого последнего фактора ничтожно.

Откачка из горизонта безнапорных вод сопровождается осушением водоносного пласта, поэтому процесс формирования воронки депрессии в безнапорных водах протекает в общем значительно медленнее, чем при откачках из напорных вод. Осушение пласта происходит тем быстрее, чем больше водопроницаемость пласта. Различной скоростью формирования кривой депрессии объясняется, между прочим, то, что при откачках из слабо проницаемых грунтов радиус депрессии меньше, чем при откачках из сильно проницаемых грунтов. Теория установившегося движения не может объяснить этого хорошо известного из практики факта, так как в условиях установившегося движения вид кривой депрессии в однородном грунте не зависит от коэффициента фильтрации.

Нельзя не согласиться в принципе с мнением Н. К. Гиринского, что при обработке данных опытных откачек по формулам установившегося движения имеет место разрыв между теорией и практикой опытных откачек.

По Гиринскому, расход воды Q в некотором сечении, находящемся в расстоянии r от совершенной скважины, из которой производится откачка в условиях безнапорных вод, связывается с расходом потока Q_n (рис. 18), проходящим через сечение, находящееся ближе к скважине, следующим уравнением

$$Q = Q_n - 2\pi \int_{r_n}^{r} \omega r dr, \tag{55}$$

где ω — количеству воды, поступающее в единицу времени на единицу площади горизонтальной проекции свободной поверхности грунтовых вод при осушении пласта в процессе откачки;

$2\pi r\,dr$ — площадь горизонтальной проекции элементарной кольцевой площадки, на которую поступает вода сверху при осушении пласта.

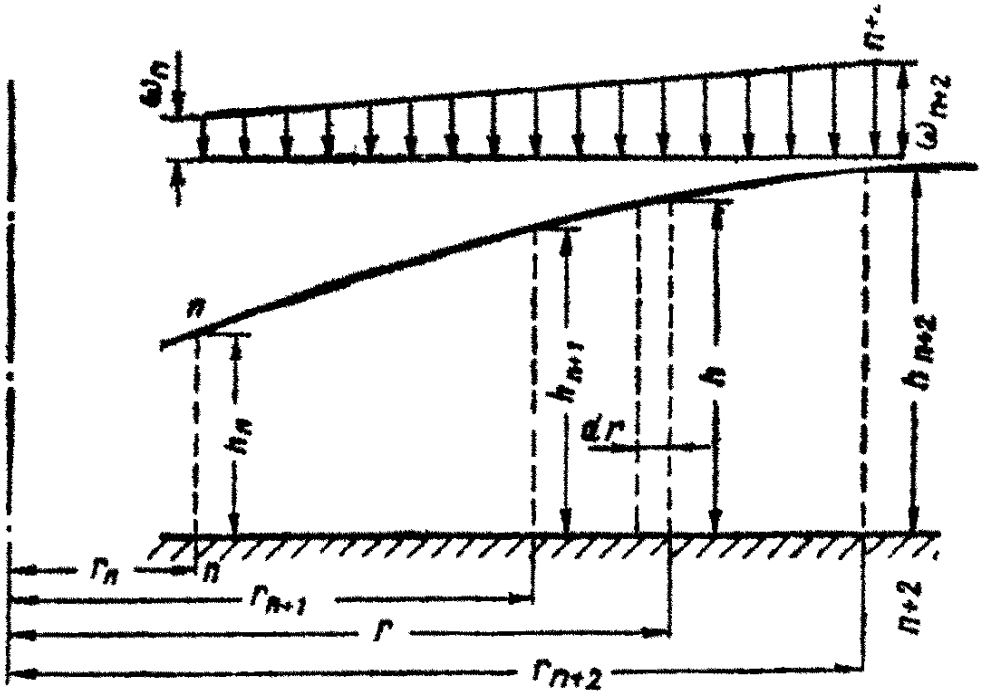


Рис. 18

Допустив, что ω изменяется по линейному закону от ω_n в сечении n до ω_{n+2} в сечении $n+2$, Гиринский после интегрирования уравнения (55) получил

$$Q = \frac{\pi K\left(h_{n+2}^2 - h_n^2\right) + \pi\left[\beta\omega_n + \gamma\left(\omega_{n+2} - \omega_n\right)\right] r_n^2}{\ln \frac{r_{n+2}}{r_n}} - \pi\left[\omega_n - \alpha\left(\omega_{n+2} - \omega_n\right)\right] r_n^2, \qquad (56)$$

где коэффициенты α, β и γ суть функции отношения $\frac{r_{n+2}}{r_n}$.

Выразив далее $\omega = \mu U$ (где μ — водоотдача грунта; U — скорость понижения уровня) проф. Н. К. Гиринский после соответствующих преобразований получил следующие формулы для расчета коэффициентов фильтрации в условиях неустановившегося движения (помещаем эти формулы в несколько преобразованном виде).

а) При расчетах по центральной скважине и наблюдательной:

$$K = \frac{1}{\left(h_1^2 - h_0^2\right)}\left[\frac{Q}{\pi}\ln\frac{r_1}{r_0} - \frac{\mu r_1^2}{9}\left(2{,}5U_0 + 2U_1\right)\right]; \qquad (57)$$

б) При расчетах по двум наблюдательным скважинам:

$$K = \frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{\left(h_2^2 - h_1^2\right)}\left\{\frac{Q}{\pi} - \mu r_1^2\left[aU_1 + b\left(U_0 - U_1\right) - \frac{1}{3}\left(U_1 - U_0\right)\right]\right\}, \qquad (58)$$

где индексы: *0* относится к центральной скважине; *1* — к первой наблюдательной; *2* — ко второй (дальней) наблюдательной скважине. Остальные обозначения ясны из рис. 3.

Значения коэффициентов a и b при обычно встречающихся отношениях $\frac{r_2}{r_1}$ приведены в табл. 4.

Таблица 4

$\frac{r_2}{r_1}$	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
a	2,16	2,30	2,44	2,58	2,73	2,87	3,01	3,17	3,32	3,48	3,64
b	0,41	0,46	0,51	0,57	0,62	0,68	0,73	0,80	0,85	0,91	0,98

Скорости понижения уровня воды в скважинах могут быть подсчитаны по данным опытных откачек по формуле (59)

$$U = \frac{S' - S''}{t}, \qquad (59)$$

где U — средняя скорость понижения уровня в скважине;
t — промежуток времени, для которого определяется U;
S' и S'' — понижения уровня воды в скважине соответственно в конце и в начале t.

Формулы (57) и (58) отличаются от формулы установившегося движения величиной, зависящей от водоотдачи грунта и скоростей понижения уровня воды в скважинах.

Если эти скорости равны нулю, то формулы (57) и (58) обращаются в формулы, отвечающие условию установившегося движения.

Для определения коэффициентов фильтрации по данным откачек из совершенных скважин (безнапорные воды) Гиринским

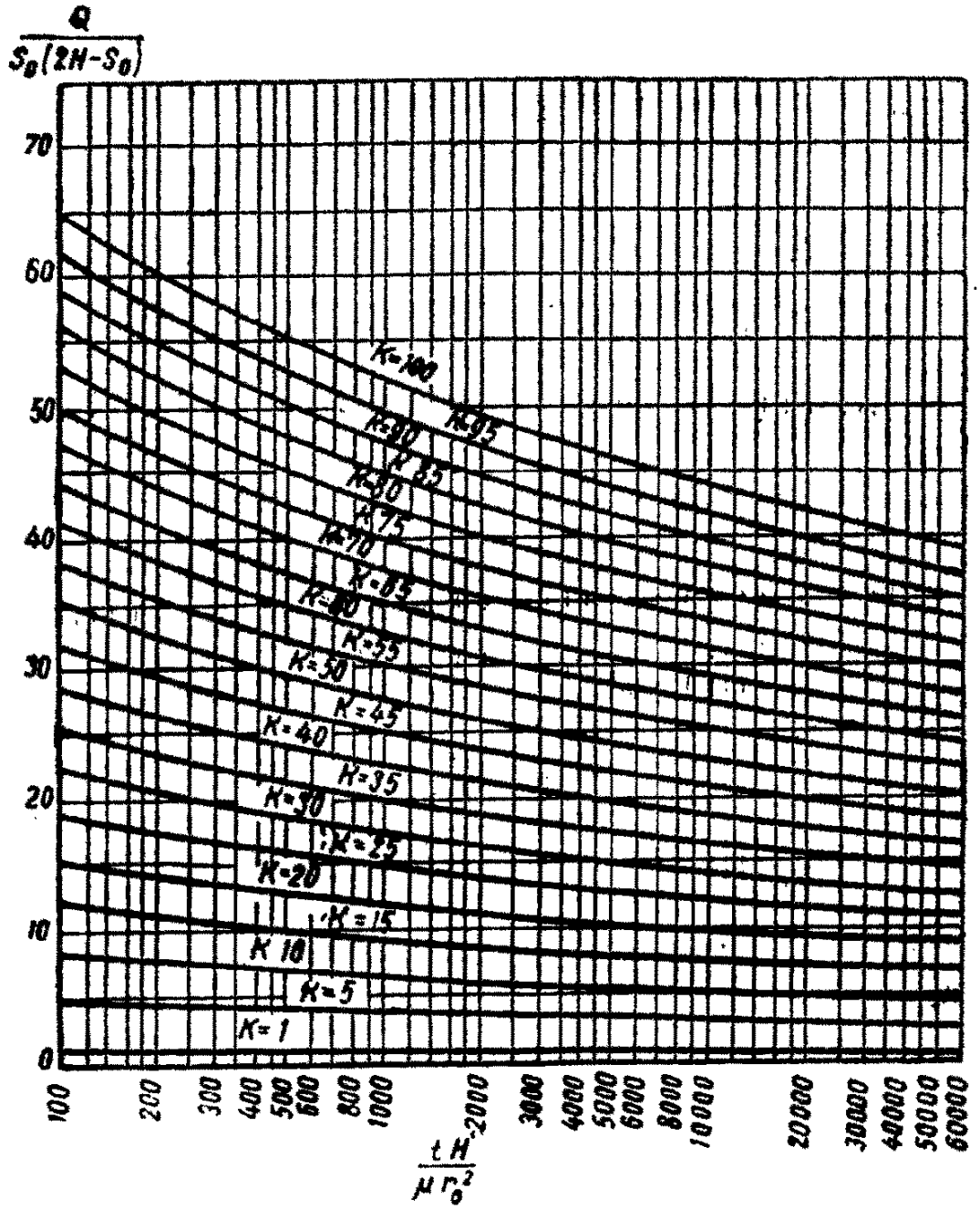


Рис. 19

составлены удобные графики (рис. 19 и 20). Для пользования графиками предварительно необходимо вычислить значения величин:

$\frac{Q}{S_0(2H-S_0)}$, откладываемой по оси ординат графика и

$\frac{tH}{\mu r_0^2}$, откладываемой по оси абсцисс,

где Q – средняя величина дебита скважины во вторую половину откачки (если откачка производится при постоянном понижении), *м²/сутки*;

S_0 — среднее понижение уровня в скважине во вторую половину откачки (если откачка производится при постоянном дебите), *м*;

H — мощность водоносного пласта, *м*;

r_0 — радиус фильтра скважины, *м*;

t — продолжительность откачки в сутках.

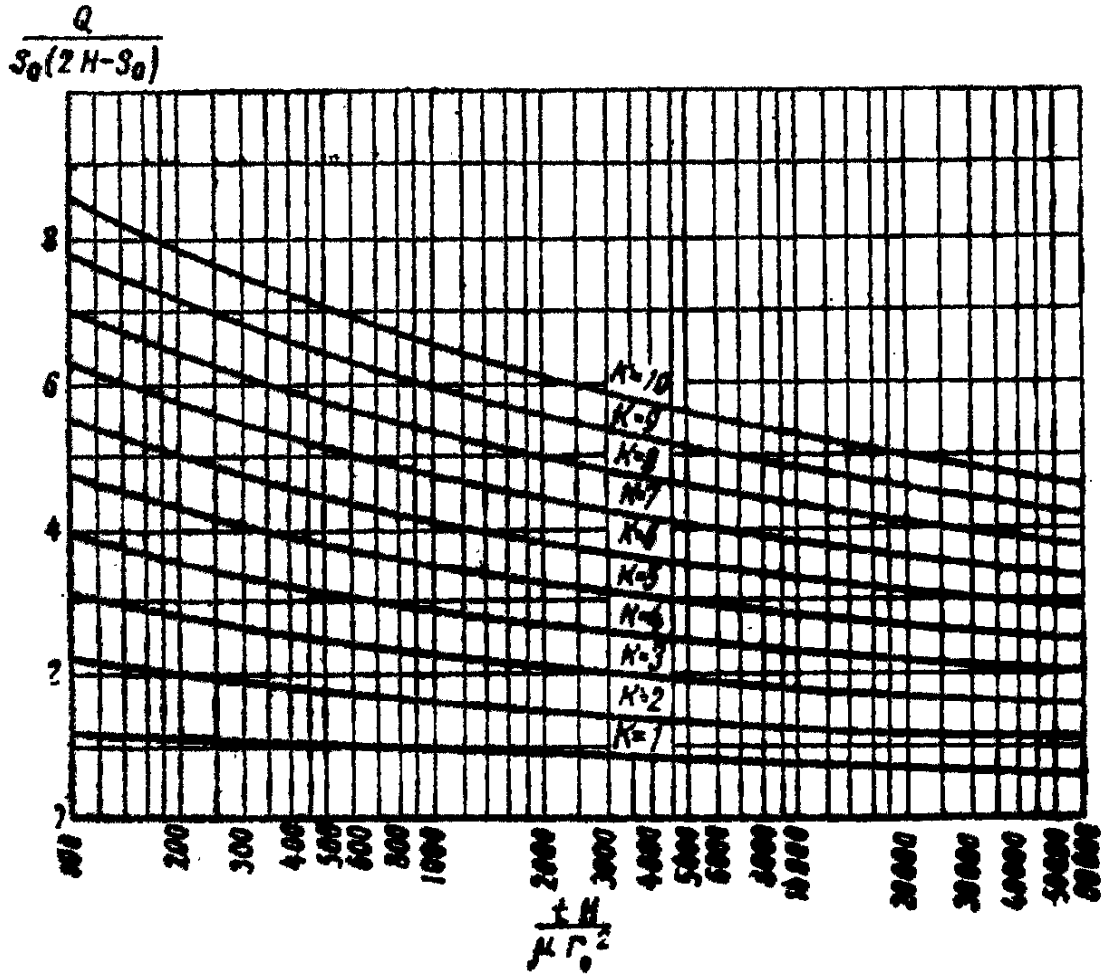


Рис. 20

Значения коэффициентов фильтрации в *м/сутки* даны на кривых графиков.

В работе Гиринского приводится следующий пример расчета коэффициента фильтрации по предлагаемым им формулам неустановившегося движения. Откачка производилась из водоносного пласта мощностью 6 *м*, дебит откачки постоянный 95 *м*³/*час*. Величина водоотдачи μ принята 0,12. Радиус фильтра центральной скважины $r_0 = 0{,}084$ *м*, расстояние до первой наблюдательной скважины $r_1 = 12$ *м*, расстояние до второй наблюдательной скважины $r_2 = 32$ *м*. Данные о понижениях уровня воды в центральных и наблюдательных скважинах приведены в табл. 5.

Таблица 5

Время замера от начала откачки в часах	Понижение уровня, *м*		
	центральная скважина	1-я наблюдательная скважина	2-я наблюдательная скважина
1	0,67	0,14	0,05
5	0,70	0,16	0,06
10	0,71	0,175	0,075

Таким образом, понижение уровня воды в центральной скважине за период, соответствующий второй половине откачки (т. е. от 5 до 10 час.), изменилось на 1 *см*, в наблюдательных — на 1,5 *см*, т. е. на величины, находящиеся вообще в пределах практической точности замеров уровня и во всяком случае несоизмеримые по точности определения с замером мощности водоносного пласта, которая выражена в целых метрах (6,0 *м*).

Сопоставим значения коэффициентов фильтрации по формулам (57) и (58), определенные в интервале времени 5—10 час., с расчетами по формулам установившегося движения (10) и (11), взяв в последнем случае данные об уровнях воды в скважинах через 1, 5 и 10 час. от начала откачки (табл. 6).

Таблица 6

Комбинация скважин при расчете	По формулам неустановившегося движения	По формулам установившегося движения		
		$t=1$ час	$t=5$ час.	$t=10$ час.
Центральная 1-я наблюдательная	24,9	24,4	24,9	25,9
1—2-я наблюдательные	22,2	27,9	24,3	25,2

Таблица показывает, что значения коэффициентов фильтрации, определенные через 1, 5 и 10 час. от начала откачки, очень близки друг к другу, что свидетельствует о том, что движение практически установилось уже через короткое время после начала откачки. Расчет по формулам неустановившегося движения при принятом значении водоотдачи $\mu = 0{,}12$ дал тот же порядок величины коэффициентов фильтрации. Следовательно, пренебрежение неустановившимся характером движения в данном случае было вполне возможно.

Рассмотренный пример относится к случаю откачки из пород со значительным коэффициентом фильтрации (около 25 *м/сутки*). Несомненно, что в слабопроницаемых породах (мелкозернистые пески, супеси и т. п.) процесс «стабилизации» воронки депрессии протекает значительно медленнее и там фактор неустановившегося движения может иметь более существенное значение. Однако и в этом случае расчет коэффициента фильтрации по основе формул неустановившегося движения возможен, по на-

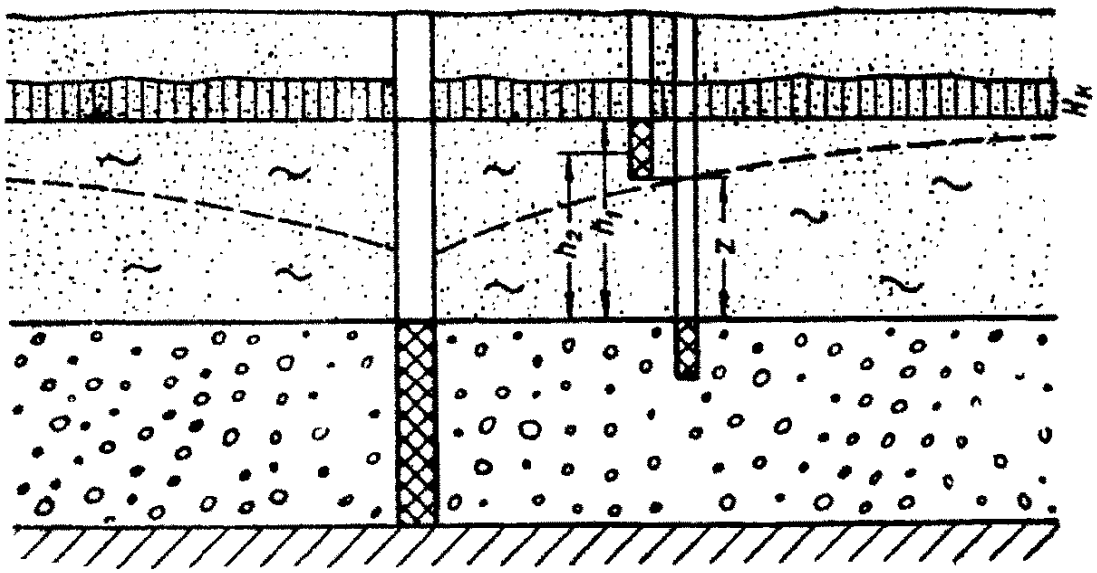


Рис. 21

шему мнению, только при достаточной точности (не менее 0,5 *см*) измерений уровней воды в процессе откачки, так как в расчет входят не только величина понижения, но и скорость изменения этой величины во времени. Требование к большой точности замера уровня является особенно жестким потому, что Н. К. Гиринский рекомендует определять коэффициент фильтрации по данным, получаемым «во вторую половину откачки», т. е. тогда, когда понижения уровней воды в скважинах происходят весьма медленно.

Существенно отметить, что значения коэффициентов фильтрации, определенные по формулам установившегося движения, всегда несколько больше, чем вычисленные по формулам неустановившегося движения, что ясно из структуры формулы (57), в которой из величины расхода вычитается положительная величина.

В. М. Григорьевым в институте ВОДГЕО, на основе уравнения неустановившегося движения подземных вод, был разработан метод определения коэффициента фильтрации слабо проницаемого слоя, ниже которого залегает значительно более проницаемый слой. Фильтр центральной скважины и одной из наблюдательных устанавливается в нижнем слое, фильтр другой наблюдательной скважины, закладываемой рядом с первой, — в верхнем слое (рис. 21). Определение коэффициента фильтрации по

этому методу основывается на том, что при откачке из нижнего слоя понижение и стабилизация напора в нем происходит быстро, в то время как в верхнем слое понижение уровня грунтовых вод, обусловленное в основном их движением сверху вниз, протекает весьма медленно.

Для расчета коэффициента фильтрации Григорьев вывел следующую формулу:

$$K = \frac{\mu (H_k + z)}{(t_2 - t_1)\, z} \left(h_1 - h_2 + z \ln \frac{h_1 - z}{h_2 - z} \right), \qquad (60)$$

где K — коэффициент фильтрации верхнего слоя;

$H_к$ — высота капиллярного поднятия;

μ — водоотдача;

h_1 — возвышение зеркала грунтовых вод в верхнем слое над кровлей нижнего слоя в начальный момент наблюдений t_1;

h_2 — то же, в конечный момент времени t_2;

z — возвышение пьезометрического уровня воды в нижнем слое над его кровлей от откачки.

При очень резком различии водопроницаемости слоев сопротивление движению воды в нижнем слое автором не учитывается, в связи с чем в формуле (60) отсутствует величина расстояния наблюдательной скважины от центральной.

Метод Григорьева можно считать применимым при весьма резком различии водопроницаемости слоев, например, в случаях, когда под суглинками лежат крупнозернистые пески, и при условии, что откачка производится с большим понижением уровня. Метод позволяет определить коэффициент фильтрации верхнего слоя при движении воды в вертикальном направлении, что представляет особый интерес при изысканиях для гидротехнического строительства, так как во многих случаях такой слабопроницаемый слой, залегающий в верхней части разреза, служит естественным понуром, уменьшающим фильтрационный расход под плотиной.

Д. ВОЗМОЖНОСТЬ НАРУШЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ОТКАЧКАХ

Как известно, в гидравлике различают два вида движения жидкости — ламинарное, при котором движение происходит без пульсации скоростей, приводящей к перемешиванию частиц, и турбулентное, при котором происходит пульсация скоростей и перемешивание частиц. Кроме того, в горных породах благодаря их неоднородности может иметь место смешанный вид движения, когда в одних порах (трещинах) движение совершается ламинарно, в других — турбулентно.

Приведенные в данной работе формулы для расчета коэффициента фильтрации основываются на допущении, что движение воды при откачках из скважин является ламинарным и характеризуется линейным законом сопротивления (законом Дарси). Возникает вопрос, в какой мере это допущение является справедливым?

Движение подземных вод в естественных условиях благодаря малым уклонам, несомненно, является ламинарным, однако при производстве откачек ламинарный режим в некоторых случаях при значительных понижениях уровня воды в скважинах, вообще говоря, может быть нарушен. Это вносит неопределенность в задачу определения коэффициентов фильтрации и последующее использование этих данных при проектировании гидротехнических сооружений.

Вопрос о пределах применения уравнений ламинарного и турбулентного движения для обработки данных опытных откачек мало исследован и является дискуссионным, хотя большинство гидрогеологов считает (и с нашей точки зрения вполне справедливо), что ламинарный режим при откачках не нарушается за исключением зоны, непосредственно примыкающей к скважине. По этому вопросу можно сослаться на мнение проф. Н. К. Гиринского, который, используя данные акад. Н. Н. Павловского о критических скоростях движения воды в песчаных и гравелистых породах, показал, что в подобных породах при величинах коэффициентов фильтрации менее 50 *м/сутки* движение подземных вод, как правило, всюду происходит по закону Дарси. При коэффициентах фильтрации до 125 *м/сутки* отклонение от линейного закона при откачках не исключено, но размеры зоны, в которой это отклонение может иметь место, столь незначительны, что ими можно пренебречь. При коэффициентах фильтрации, встречающихся как исключение (порядка 1000 *м/сутки*), зона движения по закону, отличному от закона Дарси, может иметь бо́льшие размеры, но все же незначительные по сравнению с размерами всей области фильтрации.

Приведенные соображения Гиринского относятся к опытным откачкам, производящимся из пористых пород (пески, галечники и т. п.). Что касается трещиноватых пород, то Гиринский указывает, что хотя «сделанные выше выводы могут быть с некоторой количественной поправкой распространены и на этот случай, но в общем вопрос об отклонении движения подземных вод в трещиноватых породах от закона Дарси требует, конечно, специального исследования».

По данным проф. С. В. Троянского ламинарное движение воды имеет место даже в сильно закарстованных породах, если рассматривать область фильтрации, несколько удаленную от пункта производства откачки.

Для освещения вопроса о пределах применимости закона Дарси в трещиноватых породах большой интерес представляют

лабораторные исследования движения воды в щелях различной ширины, выполненные проф. Г. М. Ломизе. Опыты были произведены в щелях с гладкими стенками и в щелях, стенки которых были оклеены мелким песком (модель шероховатости). Ломизе указывает, что отклонения от закона Дарси наступают еще до перехода ламинарного движения в турбулентное, который характеризуется числом Рейнольдса. На основании многочисленных экспериментов Г. М. Ломизе получил следующее эмпирическое выражение верхнего предела применимости линейного закона сопротивления (т. е. закона Дарси) в щелях с шероховатыми стенками:

$$N = 600\,(1 - 0{,}96\,\alpha^{0.4})^{1.5}, \tag{61}$$

где N — число, характеризующее верхний предел применимости закона Дарси;

α — относительная шероховатость щели;

$$\alpha = \frac{e}{\delta},$$

где e — абсолютная шероховатость щели, характеризуемая величиной выступа шероховатой поверхности, *см*;

δ — ширина щели, *см*.

В щелях с гладкими стенками ($\alpha = 0$) величина $N = 600$.

Число N, аналогично числу Рейнольдса, можно выразить следующим образом:

$$N = V_{кр}\,\frac{r\rho}{\mu}, \tag{62}$$

где $V_{кр}$ — критическая скорость движения воды в щели, при которой происходит нарушение применимости закона Дарси;

μ — коэффициент вязкости воды;

r — гидравлический радиус, равный $\frac{\delta}{2}$;

ρ — плотность воды.

Все величины в системе измерений *см*, *г*, сек.

Из формул (61) и (62) получим следующее выражение критической скорости

$$V_{кр} = 1200\,\frac{\mu}{\rho\delta}\,(1 - 0{,}96\alpha^{0.4})^{1.5}. \tag{63}$$

Скорость движения воды в щели, при которой действует линейный закон сопротивления Дарси, по Ломизе выражается:

$$V = \frac{g\rho}{12\mu}\,\delta^2 I\,\frac{1}{1 + 6\alpha^{1.5}}, \tag{64}$$

где g — ускорение силы тяжести;

I — гидравлический градиент потока.

Воспользовавшись формулами (63) и (64), можно написать выражение критического градиента $I_{кр}$, при котором нарушается закон Дарси, приняв значения величин: $\rho = 1$; $g = 981$; μ (при температуре 10°) $= 0{,}0131$. В этом случае

$$I_{кр} = 0{,}0026 \frac{\beta}{\partial з}, \qquad (65)$$

где

$$\beta = f(\alpha) = (1 - 0{,}96\alpha^{0.4})^{1.5}(1 + 6\alpha^{1.5}).$$

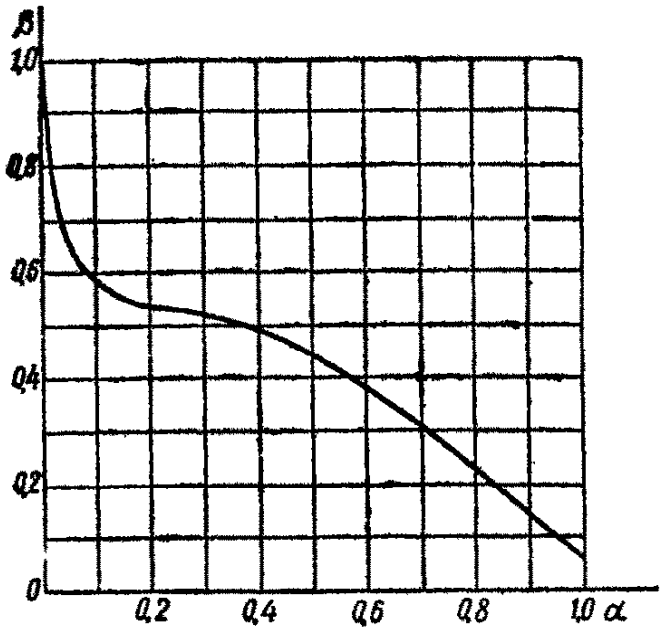


Рис. 22

Зависимость $\beta = f(\alpha)$ изображена на графике (рис. 22). Обращает внимание, что значения β в пределах значений α от 0,2 до 0,4, повидимому, наиболее распространенных в природе, изменяются мало.

В табл. 7 приведены значения критических градиентов при движении воды по щелям при различных значениях относительной шероховатости α.

Таблица 7

Ширина щели, *см*	Относительная шероховатость, α					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,1	2,600	1,508	1,404	1,352	1,274	1,114
0,2	0,325	0,188	0,175	0,169	0,159	0,143
0,3	0,096	0,056	0,052	0,050	0,047	0,042
0,4	0,041	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018
0,5	0,021	0,012	0,011	0,010	0,010	0,009

Полученные значения критических градиентов интересно сопоставить с градиентами, возникающими при откачках из скважин. Как известно, при откачке градиент потока возрастает по мере приближения к скважине, причем в условиях напорных вод при движении в соответствии с законом Дарси он выражается:

$$I = \frac{Q}{2\pi K m r}, \qquad (66)$$

где Q — дебит совершенной скважины;
K — коэффициент фильтрации;
m — мощность водоносного пласта;

r — расстояние от оси скважины до точки, в которой определяется градиент.

В этих условиях дебит совершенной скважины при ламинарном движении, как известно, выражается формулой Дюпюи

$$Q = \frac{2\pi K m \Delta S}{\ln \frac{r}{r_0}}, \tag{67}$$

где ΔS — разность понижений уровня воды в центральной и наблюдательной скважинах;

r_0 — радиус фильтра центральной скважины;

r — расстояние от центральной до наблюдательной скважины.

Подставляя в формулу (66) выражение расхода по формуле (67), получим

$$I = \frac{\Delta S}{r \ln \left(\frac{r}{r_0}\right)}. \tag{68}$$

Определим значения градиентов при откачке из скважины диаметром 200 *мм* ($r_0 = 0{,}1$ *м*) на различных расстояниях от скважины. Разность понижений уровня между центральной скважиной и наблюдательной примем $\Delta S = 0{,}5$ *м*, что является, пожалуй, предельным значением разности понижений при опытных откачках из сильно трещиноватых пород. В табл. 8 приведены значения градиентов, вычисленные по формуле (68).

Таблица 8

Расстояние от центральной скважины, *м*	Гидравлический градиент
1	0,217
2	0,083
3	0,050
4	0,034
5	0,025
10	0,011

Сопоставляя данные табл. 7 и 8, видим, что в расстоянии 5—10 *м* от центральной скважины, даже в сильно трещиноватых породах (трещины шириной 0,4—0,5 *см*) движение воды при откачке из совершенной скважины происходит по закону Дарси,

несмотря на значительную разность понижений в скважинах Вместе с тем из этих таблиц ясно, что вблизи скважины даже в слаботрещиноватых породах (трещины порядка 0,2 *см*) режим потока может быть турбулентным. Отсюда вытекает существенный методический вывод: для определения коэффициента фильтрации трещиноватых пород откачки из одиночных скважин могут дать неправильное представление; здесь следует производить кустовые откачки, причем в каждом луче должно быть не менее двух наблюдательных скважин, из которых ближайшая удалена не менее чем на 5—10 *м* от центральной.

Определение размеров трещин представляется делом исключительно сложным и в сущности удовлетворительной методики количественной оценки размеров трещин не имеется. Поэтому приведенные соображения могут служить лишь как ориентировочные для обоснования расстояний до наблюдательных скважин и допустимых величин понижений уровня воды при откачках.

Суждение о том, происходит ли нарушение закона Дарси или нет, можно получить непосредственно из данных откачек, производя их при нескольких понижениях.

При откачках в условиях напорных вод, если движение происходит по линейному закону, должно соблюдаться условие, вытекающее из формулы (8),

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{\Delta S'}{\Delta S''} = \text{const}, \tag{69}$$

где Q' — дебит скважины при разности понижений в наблюдательных скважинах $\Delta S'$;
Q'' — при $\Delta S''$.

В условиях безнапорных вод дебит совершенной скважины, по закону Дарси, выражается формулой (11).

В этом случае должно соблюдаться условие:

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{(2H - S_1' - S_2')\,\Delta S'}{(2H - S_1'' - S_2'')\,\Delta S''}. \tag{70}$$

Отклонения от указанных зависимостей (если только они не столь малы, что могут быть отнесены за счет погрешностей измерений) свидетельствуют о том, что движение происходит по закону, отличному от закона Дарси. При этом следует помнить, что зависимости (69) и (70) справедливы только для установившегося движения. Поэтому наблюдаемые иногда «отклонения» от закона Дарси при обработке данных опытных откачек во многих случаях объясняются тем, что уровни воды в скважинах не успели достаточно установиться.

II. ОПЫТНЫЕ НАГНЕТАНИЯ И НАЛИВЫ В СКВАЖИНЫ

Опытные нагнетания в скважины производятся для зонального определения так называемого удельного водопоглощения, величина которого косвенно характеризует степень трещиноватости и водопроницаемости скальных горных пород. Не останавливаясь на методике расчетов удельного водопоглощения, поскольку эта методика подробно изложена в существующих инструкциях, отметим, что данные опытных нагнетаний могут только весьма условно применяться для расчетов коэффициентов фильтрации. Дело в том, что при нагнетании, во-первых, может произойти существенная кальматация трещин породы, а во-вторых, благодаря большим давлениям, применяемым при нагнетаниях, может возникнуть турбулентное движение воды.

Оба эти обстоятельства влияют в одном направлении — в сторону занижения значения коэффициента фильтрации. Поэтому, если по каким-либо техническим причинам не удается произвести опытных откачек и прибегают к расчетам коэффициентов фильтрации по данным об удельных водопоглощениях, следует иметь в виду, что получают нижний предел значения коэффициента фильтрации породы. С этой оговоркой можно получить формулу для перехода от величины удельного водопоглощения к коэффициенту фильтрации.

Нагнетание, производимое в зону, ограниченную тампонами, с гидравлической точки зрения аналогично откачке из несовершенной скважины, фильтр которой достаточно удален от границ пласта.

Удельным водопоглощением q, как уже указывалось, называют дебит поглощающей скважины, отнесенный к единице длины опробуемого интервала l_0 и к единице напора H_0 (формула 5).

Учитывая, что в напорных условиях действие понижения уровня воды при откачке аналогично действию дополнительного напора при нагнетаниях, на основе формулы (51) и условия (5) получим следующее выражение коэффициента фильтрации через удельное водопоглощение:

$$K = \frac{q}{2\pi} \ln \left(\frac{0{,}66 l_0}{r_0} \right)$$

Коэффициент фильтрации обычно выражают в *м/сутки*, а удельное водопоглощение в *л/мин*. При этой размерности величин, переходя к десятичным логарифмам, получим

$$K = 0{,}525 q \lg \frac{0{,}66 l_0}{r_0}. \qquad (71)$$

Наливы отличаются от нагнетаний тем, что производятся при небольшом повышении уровня воды в скважине и в этом отношении имеют несомненные преимущества перед нагнетаниями, так как вероятность возникновения турбулентного движения здесь меньше. Однако возможность кальматации трещин остается в силе.

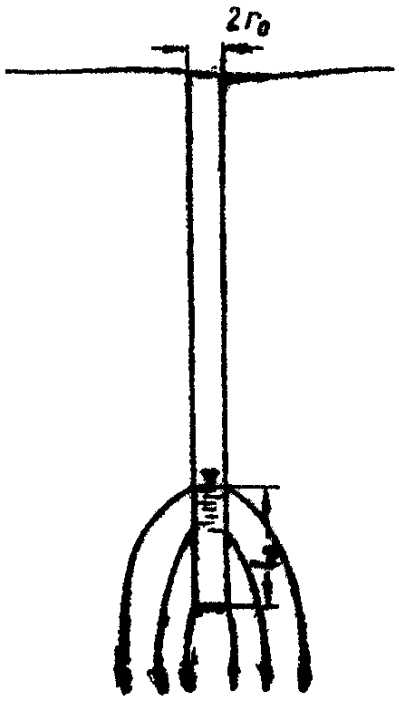


Рис. 23

При определении коэффициентов фильтрации, по данным опытных наливов, следует пользоваться формулами, применяемыми при опытных откачках, подставляя в эти формулы вместо величин понижения уровней воды величины повышений уровней воды в скважинах.

Опытные наливы применяют также для определения коэффициентов фильтрации «сухих» пород. Так, если на некоторой глубине под водопроницаемыми, но не водоносными породами залегает водоупорный пласт, можно определить коэффициент фильтрации этих пород опытными наливами в совершенные скважины, применяя формулы для откачек с теми подстановками, о которых упоминалось. Для определения коэффициентов фильтрации «сухих» пород наливами в короткие интервалы (рис. 23) Насбергом предложена следующая формула, при выводе которой допущено, что фильтрация из скважины происходит без подпора:

$$K = 0{,}423 \frac{Q}{l_0^2} \lg \frac{2l_0}{r_0}. \qquad (72)$$

Насберг показал применимость формулы в пределах:

$$12{,}5 < \frac{l_0}{r_0} < 50.$$

В трещиноватых породах применение этого метода сомнительно, вследствие большой фильтрационной неоднородности этих пород и возможности движения воды по отдельным путям - более крупным трещинам.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОТКАЧКАХ

Коэффициент скорости фильтрации K_0 характеризует скорость движения в трещинах или порах горной породы. Он связан с коэффициентом фильтрации породы выражением (4), где P_0 — скважность (в частном случае пористость) породы.

Определение коэффициента скорости фильтрации представляет существенный интерес в тех случаях, когда имеются опасения размыва трещин скальных пород или суффозии рыхлых пород. Это определение производится при откачках путем запуска индикатора (краски, соли и т. п.) в наблюдательную скважину опытного куста и фиксации времени, в течение которого индикатор проходит путь до другой наблюдательной или центральной скважины.

При откачке из совершенной скважины в условиях напорных вод расход потока можно выразить через действительную скорость движения воды U следующим образом:

$$Q = 2\pi P_0 m r U = -2\pi P_0 m r \frac{dr}{dt}, \tag{73}$$

где r — расстояние от оси центральной скважины до точки, в которой скорость движения воды равна U.

Интегрируя выражение (73), получим:

$$t = \frac{\pi P_0 m}{Q}\left(r_2^2 - r_1^2\right), \tag{74}$$

где r_1 — расстояние от оси центральной до ближней наблюдательной скважины;

r_2 — то же, до дальней наблюдательной скважины;

t — время, в течение которого индикатор проходит путь между наблюдательными скважинами.

Сделав в формулу (74) подстановку значения Q по формуле (6) и использовав выражение (4), получим:

$$K_0 = \frac{\left(r_2^2 - r_1^2\right)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\Delta S t}, \tag{75}$$

где ΔS — разность уровней воды в наблюдательных скважинах при откачке.

Расчет может быть также сделан по одной наблюдательной и центральной скважинам. В этом случае в формулу (75) надо подставить $r_1 = r_0$, а величиной ΔS считать разность уровней воды в наблюдательной и центральной скважинах.

Выведенная нами формула для определения K_0 позволяет рассчитать скорость движения воды в трещинах или порах породы под плотиной в любой точке фильтрационного потока, для чего достаточно умножить значение K_0 на величину напорного градиента, определяемую по сетке движения. Формулу (75) можно применять приближенно и при откачках в условиях безнапорных вод, если понижения уровней воды в наблюдательных скважинах незначительны по отношению к мощности водоносного пласта (не более 5—10%).

IV. ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ ИЗ ШУРФОВ

В практике гидрогеологических изысканий опытные откачки из шурфов применяются редко, хотя для решения некоторых задач этот метод безусловно представляет интерес. Так, если необходимо определить коэффициент фильтрации слабопроницаемых, но водоносных пород (суглинки, супеси), залегающих на небольшой глубине от поверхности земли (например в пойме), то откачки из скважин здесь мало применимы вследствие малого притока воды в скважину. Производство откачки из шурфа в этих условиях возможно.

Теория фильтрации воды при откачке из шурфов разработана применительно к условиям, когда шурфом вскрыты напорные воды, причем вода поступает в шурф только через дно. Однако с некоторой условностью эта теория применима и для безнапорных вод. При этом расчет по формулам напорных вод обусловит некоторое незначительное завышение коэффициента фильтрации.

Для определения коэффициента фильтрации при откачке из шурфа круглого сечения Бабушкиным в институте ВОДГЕО выведена следующая формула:

$$K = \frac{Q\left[\frac{\pi}{2} + \frac{r_0}{m}\left(1 + 0{,}515 \ln \frac{R}{4m}\right)\right]}{2\pi S_0 r_0}. \qquad (76)$$

где r_0 — радиус сечения шурфа;

m — мощность водоносного пласта, подстилаемого водоупором;

S_0 — понижение уровня воды в шурфе при откачке.

При большой мощности пласта относительно величины радиуса шурфа второе слагаемое в квадратных скобках формулы (76) стремится к нулю. В этом случае формула упрощается и приобретает следующий вид:

$$K = \frac{Q}{4 S_0 r_0}, \qquad (77)$$

Формулой (77) можно пользоваться также в тех случаях, когда на некоторой глубнне, превышающей радиус шурфа не менее чем в 8—10 раз, залегает более водопроницаемый пласт.

По эксперимментальным исследованиям Бабушкнна при откачках из шурфов квадратного сеченння в формулы (76) и (77) вместо r_0 следует подставлять величину 0,55 a, где a — сторона шурфа.

$\varphi = \operatorname{arsh} \alpha$	0	1	2	3	4
3,0	10,018	10,119	10.221	10,324	10,429
3,1	11,076	11,188	11,301	11,415	11,530
3,2	12,246	12,369	12,494	12,620	12,747
3,3	13,538	13,674	13 812	13,951	14,092
3,4	14,965	15,116	15,268	15,422	15,577
3,5	16,543	16,709	16,877	17,047	17,219
3,6	18,285	18,470	18,655	18,843	19,033
3,7	20,211	20,415	20,620	20,828	21,037
3,8	22,339	22,564	22,791	23.020	23,252
3,9	24,691	24,939	25,190	25,444	25,700
4,0	27,290	27,564	27,842	28,122	28,404
4,1	30,162	30,465	30,772	31,081	31,393
4,2	33,336	33,671	34,009	34,351	34,697
4,3	36,843	37,214	37,588	37,966	38,347
4,4	40,717	41,129	41,542	41,960	42,382
4,5	45,003	45,455	45,912	46,374	46,840
4,6	49,737	50,237	50,742	51,252	51,767
4,7	54,969	55,522	56,080	56,643	57,213
4,8	60,751	61,362	61,979	52,601	63,231
4,9	67,141	67,816	68,498	69,186	69,882
5,0	74,203	74,949	75,702	76,463	77,232
5,1	82,008	82,832	83,665	84,506	85,355
5,2	90,633	91,544	92,464	93,394	94,391
5,3	100,166	101,173	102,190	103,217	104,254
5,4	110,701	111,814	112,938	114,072	115,219
5,5	122,344	123,574	124,816	126,070	127,337
5,6	135,211	136,570	137,943	139,329	140,730
5,7	149,432	150,934	152,451	153,983	155,531
5,8	165,148	166,808	168,485	170,178	171,888
5,9	182,517	184,352	186,205	188,076	189,966

Примечание к таблице гиперболических синусов

Для отыскания arsh $d = \varphi$ следует по величине α искать в таблице
пример, требуется определить arsh 72. Для этого следует отыскать в
зонтальная строка, в которой стоит указанное число, определяет цел
Следовательно, arsh 72 = 4,97.

синусов ($\alpha = \operatorname{sh}\varphi$)

5	6	7	8	9
10,534	10,640	10,748	10,856	10,966
11,647	11,764	11,883	12,003	12,124
12,876	12,006	13,137	13,269	13,403
14,234	14,377	14,522	14,668	14.816
15,734	15,893	16,053	16,214	16,378
17,392	17,567	17,744	17,923	18,103
19,224	19.418	19,613	19,811	20.010
21.249	21,463	21,679	21,897	22,117
23,486	23,722	23,961	24,202	24,445
25,958	26,219	26,483	26,749	27,018
28,690	28.979	29,270	29,564	29,862
31,709	32,028	32,350	32,675	33,004
35,046	35,398	35,754	36,113	36.476
38,733	39,122	39,515	39,913	40,314
42,808	43,238	43,673	44,112	44,555
47,311	47,787	48,267	48,752	49.242
52,288	52,813	53,344	53,880	54,422
57,788	58,369	58,955	59,548	60,147
63,866	64,508	65,157	65,812	66,473
70,584	71,293	72,010	72,734	73,465
78,008	78,792	79,584	80,384	81,192
86,213	87,079	87,955	88,839	89,732
95,281	96,238	97,205	98,182	99,169
105,302	106,360	107,429	108,509	109,599
116,377	117,547	118,728	119,921	121,127
128,617	129,910	131,215	132,534	133,866
142,144	173 573	145,016	146,473	147,945
157,094	158,673	160,267	161,878	163,505
173,616	175,361	177,123	178,903	180,701
191,875	193,804	195,752	197,719	199,706

значение φ подобно тому, как определяется число по заданному логарифму. На таблице ближайшее к заданному числу (выделено жирным шрифтом). Горизонтальные и десятые доли искомой функции 4,9, а вертикальная—сотые 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтовский М. Е. Расчет дебита по откачкам из одиночных скважин. Госгелонздат, 1940.

2. Бабушкин В. Д. Указания по определению коэффициента фильтрации при опытных откачках из несовершенных скважин. Изд. Института ВОДГЕО, 1950.

3. Гиринский Н. К. Некоторые вопросы динамики подземных вод. Институт ВСЕГИНГЕО «Гидрогеология и инженерная геология». сб. № 9, 1947.

4. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившихся дебите и понижениях. Госгеолиздат, 1950.

5. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.

6. Каменский Г. Н. Инструкция по исследованию водопроводимости горных пород методом опытных нагнетаний. Госгеолиздат, 1946.

7. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. Госэнергоиздат, 1951.

8. Насберг В. М. Гидродинамическая сетка при фильтрации без подпора из скважины и применение сетки для определения водопроницаемости грунта. Изв. Тбил. НИИ сооружений и гидроэнергетики, т. III, 1950.

9. Определение направления и скорости течения подземных вод. Инструкция Гидроэнергопроекта. Госэнергоиздат, 1949.

10. Опытные нагнетания в одиночные скважины. Инструкция Гидроэнергопроекта, Госэнергоиздат, 1947.

11. Храмушев А. С. Исследование водоносности пластов одиночными выработками. Госгеолиздат, 1940.

Редактор *Ф. М. Бочевер*
Редактор издательства *Л. К. Рабанкова* Корректоры *А. В. Смирнов и Р. П. Нечаева*
Техн. редактор *В. Л. Прозоровская*

Т-06840 Сдано в набор 21/VII 1951 г. Подписано в печать 5/IX 1951 г.
Формат бум. 60×92¹/₁₆ Объем 1,62 бум. л.—3¹/₄ печ. л. 3,4 изд. л.
Тираж 5000 экз. Инд. 3/В Изд. № 283 Цена 3 р. 25 к. Зак. 3209

1-я типография Углетехиздата Министерства угольной промышленности СССР
Москва, Давыдовский пер., 4