Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXXII, вып. 2, 1955 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРИТОКА ВОДЫ К ВОДОЗАБОРАМ ПРИ РАЗВИТИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Доц. Е. Е. Керкис

Турбулентное движение подземных вод, как известно, возникает при значительных поперечных сечениях водопроводящих каналов в горных породах и достаточно высоких скоростях движения подземных вод и градиентах [1, 3, 5]. Чаще развитие турбулентного движения наблюдается в трещиноватых породах, пересеченных открытыми трещинами со значительным просветом и в закарстованных породах. В рыхлых пористых породах возникновение турбулентного движения имеет место только в таких сильно проницаемых породах, как галечники и гравийно-галечные образования, причем скорости фильтрации и градиенты, при которых начинается развитие турбулентного движения в этих породах, значительно выше, чем в трещиноватых и закарстованных.

В настоящее время в результате ряда исследовательских работ, проведенных в лабораторных и полевых условиях, установлено, что и в трещиноватых и даже закарстованных породах нередко имеет место ламинарное движение подземных вод [1, 2, 3, 5, 9]. Поэтому и для подобных пород можно в определенных условиях пользоваться линейным законом фильтрации (законом Дарси) и основанными на этом законе зависимостями. В частности, движение подземных вод, наблюдаемое в естественных условиях, характеризуется небольшими гидравлическими уклонами и подчиняется обычно линейному закону, даже в породах, пересеченных крупными открытыми трещинами и нередко в закарстованных.

При движении подземных вод к водозаборам по схеме радиального движения или близкой к ней наблюдаются более сложные условия. Гидравлический уклон в данном случае быстро увеличивается от внешних границ депрессии к поверхности водозабора и может на некотором расстоянии от последней достигнуть значения, превосходящего величину критического градиента, отвечающего переходу ламинарного движения в турбулентное и границе применимости линейного закона фильтрации.

Использование зависимостей, основанных на линейном законе фильтрации, для колодцев, скважин и горных выработок при радиальном движении подземных вод, рекомендуемое некоторыми гидрогеологами [8], может для груботрещиноватых и закарстованных пород привести к существенным ошибкам, поскольку градиенты во внутренней

части депрессионной воронки нередко во много раз превышают критические. Особенно высокие градиенты порядка нескольких десятков возникают у поверхности колодца при напорном движении подземных вод [3].

Однако использование для радиальных потоков зависимостей, основанных только на нелинейных законах фильтрации, например формул А. А. Краснопольского, рекомендуемое в большинстве руководств [1], также принципиально неправильно. Такие зависимости не учитывают того, что турбулентное движение развивается в пределах ограниченной зоны, размеры которой обычно значительно меньше, чем размеры всей области депрессии. В ряде случаев использование формул А. А. Краснопольского влечет за собой существенные ошибки, в результате которых получаются величины водопритоков, совершенно не соответствующие действительности.

Представления о развитии турбулентного движения для радиального потока в пределах ограниченной зоны, окружающей колодец, не являются новыми. Разделение области депрессии на зоны ламинарного и турбулентного движения и выводы соответствующих зависимостей имеются в работе А. С. Храмушева [9], а также, в несколько иной форме, у Н. К. Гиринского [2]. Некоторые данные, относящиеся к рассматриваемому вопросу, можно найти в работе Г. М. Ломизе [5]. А. С. Храмушев, например, предложил приближенную схему расчета критических градиентов по данным опытных кустовых откачек, а Н. К. Гиринский вывел зависимости, раздельно учитывающие падение напора в зоне ламинарного движения, в переходной и в зоне турбулентного движения. Рассматривая только рыхлые зернистые породы, он показал, что в них зона турбулентного движения почти всегда имеет весьма незначительные размеры, поэтому дополнительными потерями напора в этой зоне можно пренебречь.

Данные ряда опытных и эксплуатационных откачек, произведенных для водоносных горизонтов значительной водообильности, связанных с груботрещиноватыми и закарстованными породами, показывают, что развитие турбулентного движения даже в зоне относительно небольших размеров существенно влияет на производительность скважин и форму кривой депрессии.

При гидрогеологических расчетах для радиальных потоков правильнее всего, по нашему мнению, пользоваться комбинированными зависимостями, учитывающими наличие линейного закона фильтрации для внешней части области депрессии, где имеет место ламинарное движение, и нелинейного закона для внутренней зоны турбулентного движения. Развивая положения, рассмотренные в упомянутых работах [2, 5 и 3], мы имеем целью получение зависимостей, позволяющих производить не очень сложным путем различные гидрогеологические расчеты при учете развития турбулентного движения во внутренней части области депрессии.

Для зоны турбулентного движения подземных вод принимается квадратичная зависимость (формула Шези), являющаяся основой формул А. А. Краснопольского, а наличие переходной зоны смешанного движения не учитывается. Эти исходные положения, несколько схематизирующие реальные условия, не могут вызвать сколько-нибудь существенные погрешности по следующим соображениям.

1. Квадратичная зависимость достаточно хорошо отвечает действительным закономерностям для груботрещиноватых и закарстованных пород при градиентах, существенно превышающих величину критического. На это указывают результаты экспериментальных работ [1, 3, 5].

Известная зависимость Смрекера и другие нелинейные зависимости характеризуют главным образом смешанное движение подземных вод, зона развития которого в радиальном потоке подземных вод относительно невелика и поэтому при обычных гидрогеологических расчетах может не приниматься во внимание.

Главной причиной возникновения переходной зоны смешанного движения в трещиноватых и закарстованных горных породах является неодинаковое поперечное сечение (просвет) водопроводящих трещин и каналов. Поэтому при определенных значениях гидравлических градиентов в более крупных трещинах наблюдается турбулентное движение, а в более тонких — еще ламинарное. Величину критического градиента в данном случае целесообразно принимать для крупных трещин и каналов, поскольку через них проходит существенно преобладающая часть общего расхода воды. Часть же расхода, отвечающая тонким трещинам и каналам, незначительна. Это связано с тем, что расход воды, проходящей через трещины (при ламинарном движении), пропорционален третьей степени их просвета [3], а через цилиндрические каналы — четвертой степени их диаметра. Подчиненное значение тонких трещин, в которых в зоне смешанного движения сохраняется ламинарный режим, ведет также к тому, что закон фильтрации в этой зоне мало отличается от квадратичного.

2. Получаемые нередко по данным полевых опытов значения показателя m в формуле Смрекера, значительно меньшие 2, объясняются тем, что применяемые методы расчета этого показателя являются неправильными, так как формулы Смрекера для притока воды к колодцу не учитывают ограниченных размеров зоны турбулентного движения в радиальном потоке подземных вод и постепенного увеличения ее размеров при увеличении расхода воды. При параллельных расчетах показателя m по Смрекеру, проводимых для разных понижений и различных наблюдательных скважин опытного гидрогеологического куста, обычно наблюдаются значительные расхождения, не позволяющие нередко получить сколько-нибудь надежные результаты. Кроме того, значение показателя m Смрекера не должно быть постоянным, а зависит от величины градиента.

Пользование формулой Смрекера и другими нелинейными зависимостями при учете ограниченных размеров зоны турбулентного движения чрезвычайно усложняет расчеты. Прежде всего существенно затрудняется определение показателя m по данным опытных гидрогеологических работ. Для определения этого показателя правильными методами необходимо графическое решение системы показательных уравнений, причем небольшие ошибки в исходных данных сильно влияют на результаты расчетов. Аналогичные затруднения возникают при определении параметров других нелинейных зависимостей, а также при попытках учесть наличие переходной зоны смешанного движения. В последнем случае необходимо определение двух значений критического градиента — верхнего и нижнего. Формулы для определения притока воды при применении более сложных нелинейных зависимостей также сильно усложняются.

Применение квадратичной зависимости для турбулентного движения при учете ограниченных размеров соответствующей зоны является наиболее правильной основой расчетов даже для горных пород с развитием водопроводящих трещин и каналов с различным просветом. Неучет переходной зоны приводит, как правило, к меньшим ошибкам, чем широко распространенное пользование формулами А. А. Краснопольского и Смрекера для всей области депрессии или пользование только формулой Дюпюи для груботрещиноватых и закарстованных пород, в которых

в условиях притока воды к скважинам, колодцам и другим водозаборам развивается турбулентное движение.

Вместе с тем целесообразна постановка полевых экспериментальных работ, имеющих целью уточнение основных закономерностей, характеризующих турбулентное движение подземных вод для различных видов трещиноватости и закарстованности горных пород, а также проверка предлагаемых комбинированных расчетных формул.

I. Характеристика водопроницаемости горных пород при развитии турбулентного движения подземных вод

Водопроницаемость горных пород, в которых возникает турбулентное движение подземных вод в обычных условиях (например при откачке воды из буровых скважин, нагнетаниях воды и т. п.), может быть оценена следующими величинами:

K — коэффициент водопроницаемости при ламинарном движении, т. е. при линейном законе фильтрации;

$K_к$ — коэффициент водопроницаемости при турбулентном движении, т. е. при нелинейном законе фильтрации (имеется в виду квадратичная зависимость);

$I_{кр}$ — критический градиент, отвечающий переходу ламинарного движения в турбулентное (поскольку переходная зона не принимается во внимание, учитывается только одно значение $I_{кр}$).

Указанные три величины связаны следующей зависимостью (при квадратичном законе для турбулентного движения):

$$K_к = K\sqrt{I_{кр}}. \qquad (1)$$

Простое доказательство зависимости (1) дается в предшествующей нашей работе по данному вопросу [3].

Формула (1) позволяет пользоваться для характеристики водопроницаемости горных пород указанного типа (главным образом груботрещиноватых или закарстованных) только двумя из приведенных трех показателей. Удобнее всего пользоваться значениями K и $I_{кр}$; при этом величина $K_к$ может быть легко рассчитана на основании формулы (1).

Принимая величины K и $I_{кр}$ в качестве основных характеристик водопроницаемости пород, перейдем к рассмотрению уравнений притока воды к колодцам при развитии турбулентного движения в ограниченной зоне. Эти уравнения необходимы для определения значений K и $I_{кр}$ по данным опытных работ, для расчетов водопритоков и определения динамических уровней при заданном расходе воды.

II. Уравнения притока воды к колодцу для напорных вод

Зона турбулентного движения при откачке из колодца и радиальном в плане характере движения подземных вод (при однородных по водопроницаемости породах) ограничена снаружи поверхностью круглого цилиндра радиуса $r_т$ и изнутри водоприемной поверхностью колодца или скважины, т. е. цилиндрической поверхностью радиуса r_0 (рис. 1).

Величина понижения уровня в колодце S_0 в данном случае (при квадратичном законе движения подземных вод в зоне турбулентного движения) определяется зависимостью

$$S_0 = S_1 + S_2 = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_т) + \left(\frac{Q}{2\pi K_к M}\right)^2\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_т}\right), \qquad (2)$$

где $S_1 = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_т)$ — понижение уровня в зоне ламинарного движения;

$S_2 = \left(\frac{Q}{2\pi K_к M}\right)^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_т}\right)$ — понижение уровня в зоне турбулентного движения;

Q — расход воды;

M — мощность напорного водоносного горизонта;

R — радиус влияния;

$r_т$ — радиус зоны турбулентного движения.

Остальные обозначения пояснены выше.

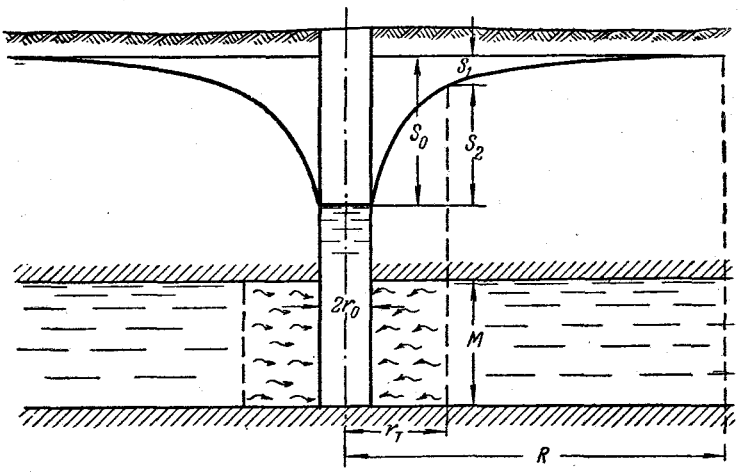


Рис. 1. Схема развития турбулентного движения при откачке из колодца в напорных водах. Понижение уровня воды:
S_0 — в колодце; S_1 — в области ламинарного движения; S_2 — в зоне турбулентного движения; M — мощность напорного водоносного горизонта; r_0 — радиус колодца; $r_т$ — радиус зоны турбулентного движения; R — радиус влияния

Преобразуем уравнение (2), заменив величину $K_к$ значением K, связанным с $K_к$ зависимостью (1). Для этого учитываем, что расстояние $r_т$ от оси колодца определяет границу зон турбулентного и ламинарного движений. Поэтому градиент напора для цилиндрической поверхности радиуса $r_т$ равен $I_{кр}$, соответственно чему

$$Q = 2\pi KMr_т I_{кр} \text{ или } I_{кр} = \frac{Q}{2\pi KMr_т}. \quad (3)$$

Подставляя указанное значение $I_{кр}$ в формулу (1), получаем

$$K_к = K\sqrt{\frac{Q}{2\pi KMr_т}} = \sqrt{\frac{KQ}{2\pi Mr_т}}. \quad (4)$$

Полученное значение $K_к$ подставим в формулу (2) и после преобразований имеем

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right); \quad (5)$$

$$Q = \frac{2\pi KMS_0}{\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1}. \quad (5')$$

Формула (5′) при $r_т = r_0$, т. е. при отсутствии зоны турбулентного движения, переходит в обычную формулу Дюпюи-Тима.

Формулы (5) и (5′) могут быть легко преобразованы для случая, когда рассматривается не вся воронка депрессии, а часть ее, ограниченная снаружи окружностью радиуса r_m ($r_m > r_т$), который может представлять, например, расстояние одной из наблюдательных скважин опытного гидрогеологического куста от оси центральной скважины. В подобном случае указанные формулы приобретают следующий вид:

$$S_0 - S_m = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln r_m - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right); \qquad (6)$$

$$Q = \frac{2\pi KM(S_0 - S_m)}{\ln r_m - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1}, \qquad (6')$$

где S_m — понижение уровня на расстоянии r_m от оси опытной скважины (например, в наблюдательной скважине, расположенной в зоне ламинарного движения).

Формулы (5′) и (6′) являются основными зависимостями для притока воды к колодцу при напорном движении подземных вод, учитывающими развитие турбулентного движения в ограниченной зоне.

Формулы (5) и (5′), а также (6) и (6′) остаются в силе и для случая налива или нагнетания воды в скважину, но в этом случае величина S_0 представляет не понижение, а повышение уровня в опытной скважине, а величина S_m — повышение уровня на расстоянии r_m от оси опытной скважины.

Ниже излагаются способы использования этих зависимостей для решения различных задач, возникающих на практике.

III. Определение основных характеристик водопроницаемости горных пород по данным опытных работ для напорных вод

Основными характеристиками горных пород в случае развития турбулентного движения в ограниченной зоне, как указано выше, целесообразно считать коэффициент фильтрации при ламинарном движении K и критический градиент $I_{кр}$.

Определение этих показателей может быть произведено по данным опытных откачек, наливов и нагнетаний для одиночных скважин и также по данным опытных работ, проводимых на гидрогеологических кустах с бóльшим или меньшим числом наблюдательных скважин. В последнем случае результаты получаются более надежными, так как имеется возможность определить ряд значений искомых показателей, а для определения $I_{кр}$ применить несколько способов.

Определения величин $I_{кр}$ для трещиноватых и закарстованных пород по теоретическим или эмпирическим формулам являются весьма ориентировочными и могут служить только для суждения о порядке этого показателя.

Рассмотрим различные способы определения значений K и $I_{кр}$ по данным полевых опытных работ.

1. Определение значений K и $I_{кр}$ по данным откачки, налива или нагнетания для одиночной скважины

Развитие турбулентного движения при гидрогеологическом опробовании одиночной скважины при напорной фильтрации, независимо от

того производится ли откачка, налив или нагнетание, отражается зависимостью между расходом и динамическим уровнем воды. При напорном движении подземных вод эта зависимость при ламинарном режиме практически является линейной (если пренебречь влиянием изменений величины радиуса депрессии при различных ступенях опыта).[1] При развитии турбулентного движения рассматриваемая зависимость перестает быть линейной и соответствующая линия на графике зависимости между расходом и понижением или повышением уровня отклоняется от прямой.

Величина K рассчитывается на основании значений расхода и понижения или повышения уровня воды в скважине, отвечающих линейной зависимости на указанном графике, по обычной формуле Дюпюи.

Для определения величины $I_{кр}$ можно применить следующие способы.

I. Расчет величины $I_{кр}$ по расходу воды $Q_т$, отвечающему переходу линейной зависимости между расходом и понижением (или повышением) уровня в нелинейную.

В данном случае для расчета $I_{кр}$ служит следующая формула:

$$Q_т = KFI_{кр} = 2\pi KMr_0 I_{кр}, \tag{7}$$

откуда

$$I_{кр} = \frac{Q_т}{2\pi KMr_0}. \tag{7'}$$

Этот простой и известный способ определения $I_{кр}$ обладает, однако, тем недостатком, что на кривой зависимости между расходом и понижением (или повышением) уровня точка, отвечающая началу развития турбулентного движения (т. е. переходу прямой линии в кривую параболической формы), почти всегда выражена нечетко. Это вызвано тем, что зона турбулентного движения первоначально имеет незначительные размеры и постепенно увеличивается при возрастании расхода воды. Поэтому при расходах, незначительно превышающих значение $Q_т$, влияние турбулентного движения на характер зависисимости между расходом и понижением выражено очень слабо.

Для более четкого определения точки, отвечающей началу развития турбулентного движения, на кривой зависимости между расходом и понижением иногда рекомендуется применять логарифмический масштаб, т. е. строить линию зависимости между $\lg Q$ и $\lg S$ [6]. Эта линия для участка линейной зависимости между Q и S представляет прямую, образующую угол 45° с осями координат. При развитии турбулентного движения, захватывающего всю область депрессии, зависимость между $\lg Q$ и $\lg S$, в соответствии с формулой А. А. Краснопольского для напорных вод, выражается прямой линией, наклоненной под углом 63°25′ к оси, на которой откладываются величины $\lg Q$. При турбулентном движении, захватывающем только часть депрессионной воронки, линия, изображающая рассматриваемую зависимость, имеет промежуточный уклон. Однако при захвате турбулентным движением значительной части области депрессии (примерно более $^1/_5$—$^1/_4$ по диаметру) эта линия, как показывают примерные расчеты, сравнительно мало отклоняется от прямой

[1] При значительных расходах воды в глубоком залегании напорного водоносного горизонта отклонение от линейной зависимости может возникать до начала развития турбулентного движения в водоносном пласте за счет потерь напора при движении воды по стволу скважины. В данном случае расчет указанных потерь напора по соответствующим гидравлическим формулам позволяет ввести поправки, в результате чего для расходов, отвечающих ламинарному движению вод, получается зависимость, очень близкая к линейной.

с углом 63°25′, что облегчает интерполяцию, необходимую для нахождения переходной точки.

Другим недостатком данного метода определения $I_{кр}$ является необходимость проведения опыта при достаточном числе ступеней (понижений уровня при откачке, повышений при наливе и нагнетании), чтобы линия зависимости между Q и S_0 была достаточно обоснованной. Так, при обычно принятой методике проведения опытов с тремя ступенями переходная точка может быть определена только очень ориентировочно и при условии, что первые две ступени соответствуют расходам, при которых турбулентное движение еще не возникло. Для надлежащего же обоснования линии необходимо не менее четырех — пяти ступеней.

II. Расчет величины $I_{кр}$ на основании зависимостей (5) и (3).

Для получения расчетной зависимости определяем из формулы (3) величину

$$r_т = \frac{Q}{2\pi KMI_{кр}}.$$

Подставив полученное значение $r_т$ в формулу (5), после алгебраических преобразований получим следующее уравнение:

$$\frac{Q}{2\pi KMr_0}\frac{1}{I_{кр}} - \ln\frac{1}{I_{кр}} = \frac{2\pi KMS_0}{Q} - \ln\frac{2\pi KMR}{Q} + 1. \qquad (8)$$

70692

Определение $I_{кр}$ из уравнения (8) возможно только способом подбора или графическим методом.

Для определения $I_{кр}$ способом подбора (по схеме автора) следует прежде всего убедиться на основании формы линии зависимости между расходом и понижением в том, что турбулентное движение при опыте имело место. Затем в формулу (8) подставляются значения Q и S_0, соответствующие заведомо криволинейному участку зависимости Q от S_0, после чего $I_{кр}$ определяется посредством подбора.

Для упрощения расчетов нами составлена номограмма (рис. 2), позволяющая определить значение отношения $\frac{r_т}{r_0} = \rho$ на основании зависимости (5), которая для этого приведена к виду

$$\frac{r_т}{r_0} - \ln\frac{r_т}{r_0} = 1 + \frac{2\pi KMS_0}{Q} - \ln\frac{R}{r_0} = A.$$

На рис. 2 правая логарифмическая шкала отвечает различным значениям A, представляющим величину правой части приведенного уравнения, а левая логарифмическая шкала позволяет найти значения $\rho = \frac{r_т}{r_0}$, отвечающие различным значениям A.

После определения величины $\rho = \frac{r_т}{r_0}$ значение $I_{кр}$ рассчитывается по формуле (3), в которую подставляется величина $r_т = \rho r_0$.

Рассмотренный способ определения значения $I_{кр}$ является более надежным, чем предыдущий, так как ошибки за счет неточного установления точки кривой зависимости между Q и S_0, отвечающей переходу ламинарного движения в турбулентное, в данном случае не возникает. Кроме того, при наличии более одного понижения или повышения уровня на участке турбулентного движения в данном случае возможно определение двух или более взаимно контролирующих значений $I_{кр}$.

Донецкий ... БИБЛИОТЕКА

Основные погрешности в определении $I_{кр}$ таким способом возникают за счет значительной ориентировочности величины радиуса влияния R, а иногда также за счет входных потерь напора, вызывающих нередко увеличение значения S_0. Эти погрешности, так же как и неточность определения коэффициента водопроницаемости K, могут быть устранены при проведении опытов на гидрогеологических кустах.

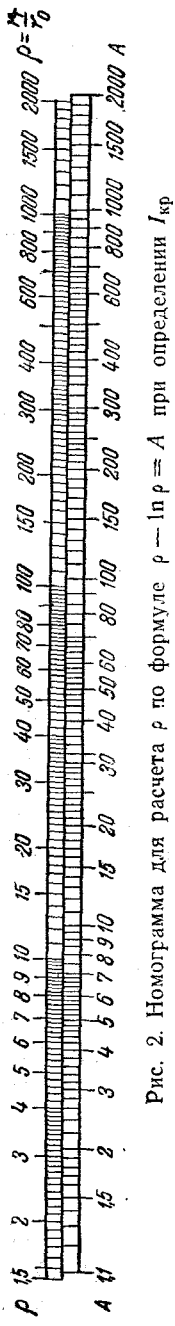


Рис. 2. Номограмма для расчета ρ по формуле $\rho = \ln \rho = A$ при определении $I_{кр}$

2. *Определение значений K и $I_{кр}$ по данным опытных работ на гидрогеологическом кусте*

Кустовая откачка, налив и нагнетание в центральную скважину опытного гидрогеологического куста дают прежде всего возможность более точного определения величины K — коэффициента водопроницаемости при ламинарном движении, который рассчитывается по обычной формуле Дюпюи для двух наблюдательных скважин. Для этого могут быть использованы две любые наблюдательные скважины, расположенные при данном понижении или повышении в области ламинарного движения. Зона ламинарного движения может устанавливаться по форме линий зависимости между расходом и понижениями или повышениями уровня в наблюдательных скважинах, которые при ламинарном движении весьма близки к прямым, а при турбулентном — заметно искривляются. Для выделения области ламинарного движения целесообразно также воспользоваться способом С. А. Коля — преобразованием депрессионной линии в прямую [6]. Для напорных вод это достигается применением логарифмического масштаба для расстояний наблюдательных скважин от оси центральной. В области ламинарного движения депрессионная линия, преобразованная данным способом, должна представлять прямую. В зоне же турбулентного движения она резко отклоняется от этой прямой, приобретая значительно больший уклон по отношению к горизонтальной оси.

Для опытного гидрогеологического куста $I_{кр}$ может быть определено следующими способами.

I. Расчет на основании значений расхода, отвечающий переходу ламинарного движения в турбулентное. Этот способ, рассмотренный выше применительно к одиночной скважине, для опытного куста может быть использован как для центральной, так и для наблюдательных скважин, оказавшихся при достаточно больших расходах в зоне турбулентного движения. Об этом можно судить по форме линий зависимости между понижением или повышением уровня и расходом для наблюдательных скважин, а также, как указано выше, по форме депрессионной линии, преобразованной по способу С. А. Коля.

Расчет величины $I_{кр}$ производится по формуле, по существу, одинаковой с выражением (3),

$$I_{кр} = \frac{Q_т}{2\pi K M r_m},$$

где $Q_т$ — расход воды, отвечающий переходу ламинарного движения в турбулентное на расстоянии $r_т$ от оси центральной скважины;

r_m — расстояние наблюдательной скважины, по данным которой производится расчет $l_{кр}$, от оси центральной скважины.

Недостатки данного способа определения $l_{кр}$, обусловленные нечеткостью переходной точки на кривой зависимости между расходом и понижением или повышением и необходимостью проведения опыта при значительном числе ступеней (понижений или повышений), остаются те же, что и для одиночной скважины.

II. Расчет величины $l_{кр}$ на основании зависимостей (6) и (3). Этот способ определения $l_{кр}$, предлагаемый автором, аналогичен описанному выше для одиночной скважины.

Определение $l_{кр}$ может производиться способом подбора по уравнению, полученному так же, как и зависимость (8),

$$\frac{Q}{2\pi KMr_0}\frac{1}{l_{кр}} - \ln\frac{1}{l_{кр}} = \frac{2\pi KM(S_0 - S_m)}{Q} - \ln\frac{2\pi KMr_m}{Q} + 1, \qquad (8')$$

где S_m — понижение уровня в наблюдательной скважине, находящейся в области ламинарного движения;

r_m — расстояние указанной наблюдательной скважины от оси центральной скважины.

Наряду с решением уравнения (8′) способом подбора можно использовать номограмму (рис. 2), определив по ней величину $\rho = \frac{r_т}{r_0}$.

Значение A на номограмме, отвечающее правой логарифмической шкале, в данном случае рассчитывается по формуле, аналогичной выражению, приведенному на стр. 17.

$$A = 1 + \frac{2\pi KM(S_0 - S_m)}{Q} - \ln\frac{r_m}{r_0}.$$

Дальнейшие расчеты ведутся так же, как и для одиночной скважины.

Если на опытном гидрогеологическом кусте есть также наблюдательная скважина, расположенная в зоне турбулентного движения (обычно такой скважиной является первая, ближайшая к центральной, наблюдательная скважина), то в рекомендуемых формулах понижение или повышение уровня в центральной скважине S_0 можно заменить величиной S_1 — понижения или повышения уровня в данной наблюдательной скважине и соответственно величину радиуса центральной скважины r_0 — расстоянием r_1 указанной наблюдательной скважины от оси центральной. При подобном способе расчета может быть исключено влияние входных потерь напора, возможных при частичном заполнении трещин у поверхности опытной скважины буровым шламом, глинистым материалом и т. п.

Определение $l_{кр}$ посредством зависимостей (6) и (3) для опытного куста более надежно, чем аналогичный способ для одиночной скважины, так как позволяет избежать ошибок, возникающих за счет ориентировочности величины радиуса влияния и входных потерь напора.

III. Определение величины $l_{кр}$ путем нахождения границы турбулентного движения по очертанию депрессионной линии. Как указано выше, применение логарифмического масштаба для расстояний наблюда-

тельных скважин от оси центральной преобразует депрессионную линию в области ламинарного движения в прямую, а для зоны турбулентного движения дает линию, имеющую значительно больший уклон к оси абсцисс. На расстоянии $r_т$ от оси центральной скважины опытного куста наблюдается излом депрессионной линии, построенной указанным способом. Определить положение точки излома можно при наличии не менее одной (лучше двух) наблюдательных скважин в зоне турбулентного движения и не менее двух наблюдательных скважин в области ламинарного движения. При этом излом совпадает с точкой пересечения продолжений отрезков депрессионных линий, проведенных по данным скважин, расположенных в зоне турбулентного движения (включая центральную скважину), и по данным наблюдательных скважин, находящихся в области ламинарного движения.

Расчет величины $I_{кр}$ в данном случае производится по формуле (3).

Этот способ определения менее точен, чем предыдущий, так как точку излома депрессионной линии и соответствующее ей расстояние $r_т$ можно вполне правильно найти только при большом числе наблюдательных скважин. В обычных же случаях эта точка находится более или менее приближенно. Однако простота и наглядность данного способа и возможность получения значений $I_{кр}$ для разных понижений или повышений уровня позволяют рекомендовать его в дополнение к предыдущему.

Таким образом, опытные гидрогеологические кусты позволяют более точно определить характеристики водопроницаемости горных пород при развитии турбулентного движения подземных вод. Величина $I_{кр}$ может определяться по данным опытов на гидрогеологических кустах различными способами. Каждый способ дает возможность рассчитать значения $I_{кр}$ при различных вариантах исходных данных (по различным наблюдательным скважинам и различным понижениям или повышениям уровня). Таким образом, получается целый ряд значений $I_{кр}$, контролирующих друг друга и позволяющих определить наиболее вероятное — среднее из них.

Большая надежность определения величины $I_{кр}$ для опытных гидрогеологических кустов связана также с получением более точного значения K — коэффициента водопроницаемости при ламинарном движении, входящего во все формулы расчета $I_{кр}$.

3. Определение притока воды к водозаборам для напорных вод

Зависимости (3) и (5) могут служить для определения величины Q — притока воды в скважины, колодцы, а также горные выработки и котлованы при развитии турбулентного движения в ограниченной зоне. При этом для горных выработок имеется в виду схема «большого колодца», приводящая площадь выработок к круглому колодцу значительного диаметра и рассматривающая движение подземных вод как радиальное в плане.

Прежде чем производить расчеты, необходимо убедиться в том, что турбулентное движение развивается. Для этого определяется величина входного градиента $I_{вх}$ по формуле, основанной на линейном законе фильтрации.

На основании линейного закона фильтрации

$$Q = KFI = 2\pi KMr_0 I_{вх},$$

откуда

$$I_{вх} = \frac{Q}{2\pi K M r_0}. \qquad (9)$$

Подставляя в это выражение значение Q согласно формуле Дюпюи, после сокращений получаем

$$I_{вх} = \frac{S_0}{r_0 (\ln R - \ln r_0)}, \qquad (9')$$

где S_0 — понижение уровня при откачке из скважины, колодца или горных выработок;

r_0 — радиус скважины, колодца, а для горных выработок — радиус большого колодца;

R — радиус влияния.

Если $I_{вх} < I_{кр}$, то турбулентного движения наблюдаться не будет и расчет притока воды следует вести по формулам для ламинарного движения. При $I_{вх} > I_{кр}$ образуется зона турбулентного движения и расчеты водопритока необходимо вести на основании зависимостей (3) и (5). При этом рекомендуется следующая схема расчетов.

Подставляя в зависимость (5) значение Q согласно выражению (3), после несложных преобразований имеем

$$r_т\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right) = \frac{S_0}{I_{кр}}. \qquad (10)$$

Уравнение (10) позволяет найти величину радиуса зоны турбулентного движения методом подбора. Подставляя значение $r_т$ в формулу (3), находим расход воды Q. В качестве проверочного расчета рекомендуется также определение величины Q по формуле (5′) после подстановки в нее полученного значения $r_т$.

Решение уравнения (10) возможно способом подбора или по составленной нами номограмме (рис. 3), позволяющей определить величину отношения $\rho = \frac{r_т}{r_0}$. Основой для номограммы является преобразованное уравнение (10)

$$\rho\left(\rho - \ln \rho + \ln \frac{R}{r_0} - 1\right) = \frac{S_0}{r_0 I_{кр}}. \qquad (10')$$

По номограмме рис. 3 вначале рассчитываются значения $\frac{R}{r_0}$ и $x = \frac{S_0}{r_0 I_{кр}}$. Затем находится кривая, отвечающая полученному или близкому ему значению $\frac{R}{r_0}$. Искомая величина ρ определяется как ордината точки указанной кривой, имеющей абсциссу x. Для промежуточных значений $\frac{R}{r_0}$ применяется интерполяция.

Расчет величины Q производится, как указано выше, по формулам (3) и (5′) после подстановки значения $r_т = \rho r_0$.

Примеры расчетов, приведенные ниже, показывают, что развитие турбулентного движения, даже при небольших размерах соответствующей зоны, существенно уменьшает величину Q. Обычные расчеты для случаев развития турбулентного движения, производимые по формуле А. А. Краснопольского, дают бо́льшие или меньшие отклонения от результатов расчетов по рассмотренной схеме. Эти отклонения достигают значительных величин при больших значениях r_0.

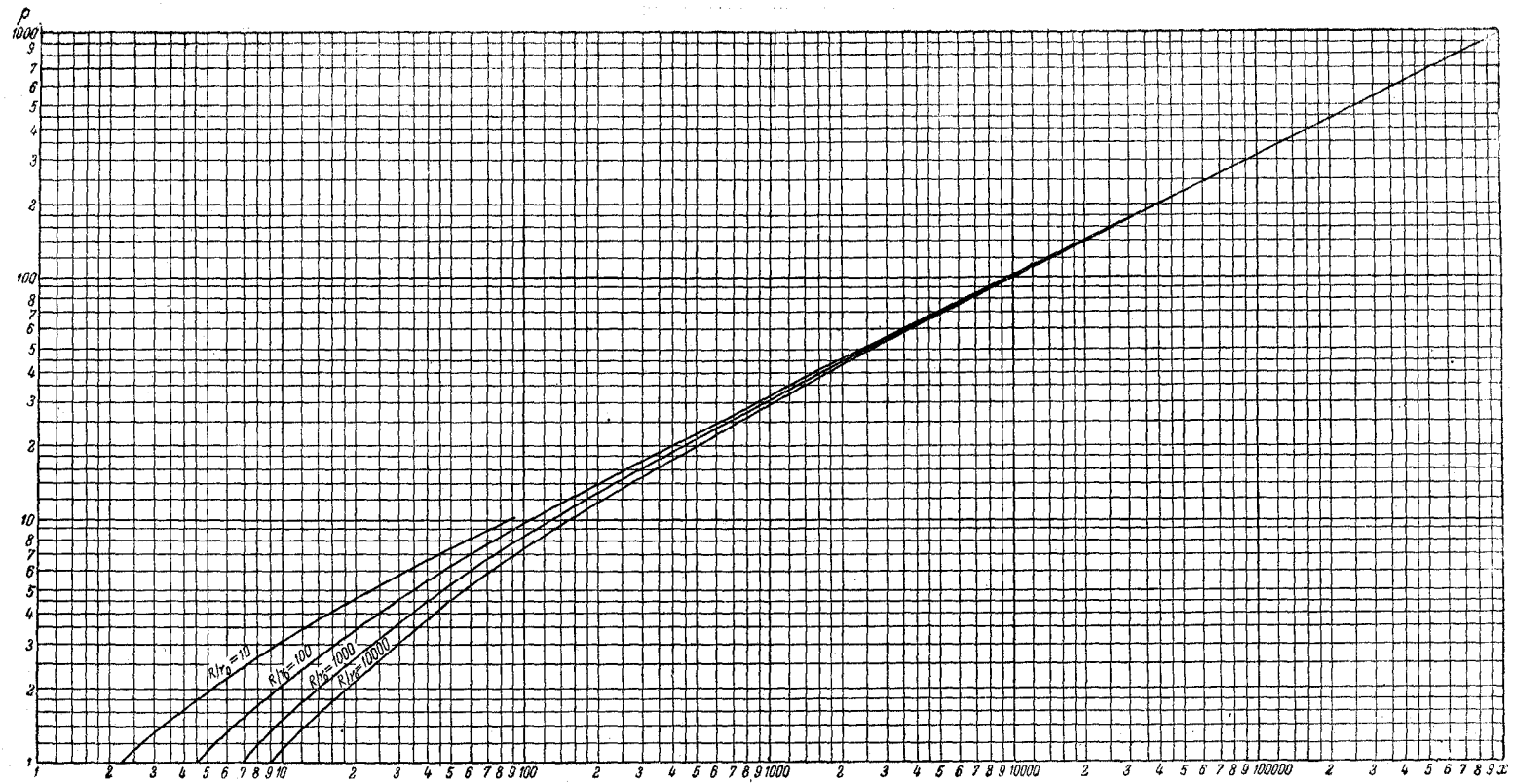


Рис. 3. Номограмма для расчета ρ по формуле

$$\rho\left(\rho - \ln\rho + \ln\frac{R}{r_0} - 1\right) = x. \qquad \rho = \frac{r_т}{r_0},\ x = \frac{S_0}{r_0 I_{кр}}$$ — напорное движение; $$x = \frac{H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2}}{r_0 I_{кр}}$$ — напорное движение, переходящее в безнапорное при $r_т > r_б$

4. Определение понижения уровня в колодцах по заданному расходу воды для напорных вод

Задача определения понижений уровня в колодцах по заданному расходу воды возникает при проектировании эксплуатационных и водопонижающих скважин значительной производительности в породах, для которых возможно развитие турбулентного движения. Расчеты показывают, что даже при небольшом радиусе зоны турбулентного движения понижение уровня для получения заданного расхода должно быть значительно бо́льшим, чем при ламинарном движении.

Определение понижения уровня S_0 ведется следующим образом. Прежде всего устанавливается, возможно ли в данных условиях развитие турбулентного движения. Для этого на основании величины заданного расхода Q рассчитывается значение входного градиента по формуле (9) (для линейного закона фильтрации).

Турбулентное движение может наблюдаться только при $I_{вх} > I_{кр}$. Тогда величина понижения S_0 определится уравнением (8), решение которого относительно S_0 дает следующую формулу:

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\frac{Q}{2\pi KMr_0 I_{кр}} + \ln\frac{2\pi KMRI_{кр}}{Q} - 1\right). \qquad (11)$$

Можно также первоначально определить величину радиуса зоны турбулентного движения $r_т$ по формуле (3′), а затем рассчитать S_0, подставив полученное значение $r_т$ в формулу (5).

Задача рассматриваемого вида является более простой, так как не требует решения уравнений методом подбора или посредством специальных номограмм.

IV. Уравнения притока воды к колодцу при развитии турбулентного движения в ограниченной зоне для безнапорных вод

При безнапорном движении подземных вод уравнения притока воды к колодцу при развитии турбулентного движения в ограниченной зоне приобретают более сложный вид. Соответственно усложняется и решение задач, возникающих в практике.

Исходные уравнения в данном случае следующие (рис. 4):

$$Q = 2\pi K r_т h_т I_{кр}; \qquad (12)$$

$$H^2 - h_т^2 = \frac{Q}{\pi K}(\ln R - \ln r_т); \qquad (13)$$

$$h_т^3 - h_0^3 = 3\left(\frac{Q}{2\pi K_к}\right)^2\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_т}\right), \qquad (14)$$

где H — мощность безнапорного водоносного горизонта;

h_0 — высота уровня воды в колодце, измеренная от уровня водоупорного ложа;

$h_т$ — высота уровня подземных вод на расстоянии от оси колодца, отвечающем переходу ламинарного движения в турбулентное.

Уравнение (12) представляет выражение линейного закона фильтрации для цилиндрического сечения радиального потока на границе перехода ламинарного движения в турбулентное, уравнение (13) — формулу Дюпюи для области ламинарного движения, уравнение (14) — формулу

А. А. Краснопольского для зоны турбулентного движения радиусом $r_т$.

Уравнение (14) целесообразно преобразовать следующим образом. На основании формулы (12) определяем величину

$$I_{кр} = \frac{Q}{2\pi K r_т h_т}.$$

Подставляя это значение $I_{кр}$ в формулу (1), имеем

$$K_к = K\sqrt{\frac{Q}{2\pi K r_т h_т}} = \sqrt{\frac{KQ}{2\pi r_т h_т}}.$$

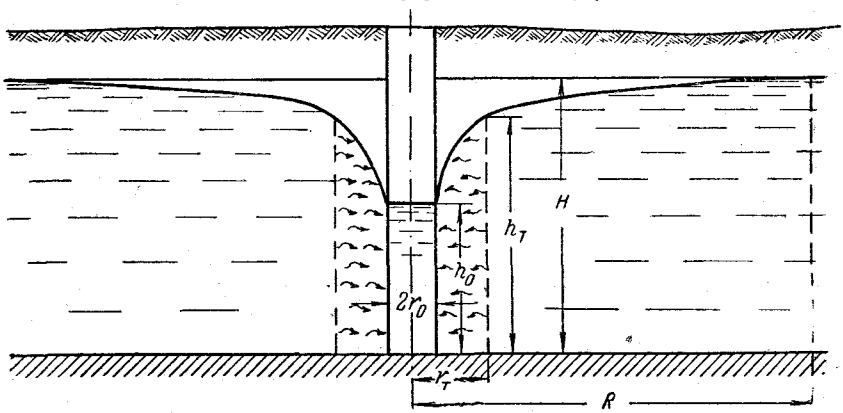


Рис. 4. Схема развития турбулентного движения при откачке из колодца в безнапорных водах:

h_0 — динамический уровень воды в колодце; $h_т$ — уровень подземных вод на границе ламинарного и турбулентного движений; H — мощность водоносного горизонта; r_0 — радиус колодца; $r_т$ — радиус зоны турбулентного движения; R — радиус влияния

Подставляя это значение $K_к$ в формулу (14), после сокращений и несложных преобразований получим

$$h_т^3 - h_0^3 = \frac{3}{2}\frac{Q}{\pi K} h_т\left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right). \qquad (14')$$

Уравнения (12), (13) и (14′) представляют основные зависимости для притока воды в колодец при безнапорных водах и развитии турбулентного движения в ограниченной зоне.

При изменении знака обоих членов левой части зависимостей (13) и (14′) приведенная система уравнений применима также для случая налива воды в буровую скважину.

1. Определение основных характеристик водопроницаемости горных пород по данным опытных работ для безнапорных вод

Определение значений K и $I_{кр}$ по данным опытных работ на одиночной скважине. Зависимость между расходом и понижением или повышением уровня для одиночной скважины является нелинейной как при ламинарном, так и при турбулентном движении. Для определения расхода, отвечающего переходу ламинарного движения в турбулентное, в данном случае целесообразно воспользоваться графиком зависимости между расходом Q и величиной

$S_0(2H - S_0)$ при откачке или $S_0(2H + S_0)$ при наливе (S_0 — соответственно понижение или повышение уровня в опытной скважине).

При ламинарном движении, в соответствии с формулой Дюпюи, графическое изображение рассматриваемой зависимости будет представлять линию, очень близкую к прямой. При турбулентном движении зависимость становится нелинейной и изображается линией с выпуклостью в сторону оси координат, на которой откладывается расход. Это дает возможность найти на этой линии точку, отвечающую началу развития турбулентного движения аналогично нахождению подобной точки при напорном движении подземных вод на линии зависимости между Q и S_0.

Коэффициент водопроницаемости при ламинарном движении вычисляется по формуле Дюпюи по данным, отвечающим участку линейной зависимости между величинами, указанными выше.

Для определения величины $I_{кр}$ при одиночной скважине применимы следующие способы.

Расчет величины $I_{кр}$ по расходу воды $Q_т$, отвечающему началу развития турбулентного движения. Расход воды $Q_т$ отвечает переходной точке линии зависимости между расходом и величиной $S_0(2H - S_0)$ или $S_0(2H + S_0)$, т. е. точке, где наблюдается отклонение указанной линии от прямой.

$$I_{кр} = \frac{Q_т}{2\pi K r_0 h_0}. \qquad (15)$$

Эта формула представляет следствие линейного закона фильтрации для поверхности опытной скважины. Недостатком данного способа является также трудность надежного определения переходной точки. Кроме того, для безнапорных вод на форму линии зависимости между расходом и величиной $S_0(2H - S_0)$ или $S_0(2H + S_0)$ может влиять неоднородность водопроницаемости пород по вертикали [1] (почти всегда наблюдающаяся в трещиноватых и закарстованных породах), а также непостоянство входного градиента на различных глубинах, имеющее место и для однородных пород, особенно при больших значениях S_0. Эти обстоятельства еще более затрудняют определение переходной точки и позволяют заключить, что рассматриваемый способ определения величины $I_{кр}$ можно применять только в породах, водопроницаемость которых мало меняется в вертикальном направлении, и при небольших понижениях или повышениях уровня.

Определение величины $I_{кр}$ на основании зависимостей (12), (13) и (14′). Величина расхода воды Q и динамический уровень h_0 при явном развитии турбулентного движения для криволинейного участка линии зависимости между Q и $S_0(2H - S_0)$ или $S_0(2H + S_0)$ позволяют определить величины $r_т$ и $h_т$ посредством совместного решения уравнений (13) и (14′), представляющих в данном случае два уравнения с двумя неизвестными. Решение этих уравнений трудоемко, но может быть произведено графическим способом после следующих преобразований.

Определяем величину $h_т$ из уравнения (13):

$$h_т = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K}(\ln R - \ln r_т)}.$$

[1] При безнапорных водах высота живого сечения потока подземных вод меняется в зависимости от понижения динамического уровня и захватывает различные зоны пород по вертикали.

Подставляя это значение $h_т$ в зависимость (14′), имеем

$$\left[H^2 - \frac{Q}{\pi K}(\ln R - \ln r_т)\right]^{\frac{3}{2}} - h_0^3 =$$

$$= \frac{3}{2}\frac{Q}{\pi K}\left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right)\left[H^2 - \frac{Q}{\pi K}(\ln R - \ln r_т)\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (16)$$

Для определения $r_т$ из уравнения (16) лучше применить графический метод. Для этого, задаваясь различными значениями $r_т$, рассчитываем отвечающие им величины левой и правой частей уравнения (16). Затем строим график с двумя кривыми, абсциссы точек которых равны заданным значениям $r_т$, а ординаты — соответствующим значениям для первой кривой — левой части уравнения (16) и для второй — правой его части. Абсцисса точки пересечения указанных двух кривых является искомым значением $r_т$.

Величину $h_т$ определяем, подставив полученное значение $r_т$ в уравнение (13′).

Величину $I_{кр}$ определяем на основании формулы (12) после подстановки в нее полученных численных значений $r_т$ и $h_т$, т. е. на основании формулы

$$I_{кр} = \frac{Q_т}{2\pi K r_т h_т}.$$

Данный способ определения $I_{кр}$ хотя и более сложен, но надежнее. [1]

Определение значений K и $I_{кр}$ по данным опытных работ на гидрогеологическом кусте

Для безнапорных вод, так же как и для напорных, кустовая откачка или налив дают возможность определить значения K и $I_{кр}$ более точно и получить большее число взаимно контролирующих величин.

Определение значения K производится для гидрогеологического куста по формуле Дюпюи для любых двух наблюдательных скважин, расположенных в зоне ламинарного движения при данном понижении или повышении уровня в опытной скважине. Область ламинарного движения может быть установлена по характеру зависимости между расходом Q и величиной $S(2H - S)$ при откачке или $S(2H + S)$ при наливе (S — понижение или повышение уровня в наблюдательных скважинах). Эти линии при ламинарном движении практически являются прямыми, при турбулентном — заметно искривляются.

Для выделения зоны турбулентного движения можно применить и способ С. А. Коля [6]. Преобразование депрессионной линии в прямую в области ламинарного движения для безнапорных вод достигается при этом применением логарифмического масштаба для расстояний от наблюдательных скважин от оси центральной и квадратичного масштаба для h (т. е. нанесением на оси ординат значений h^2, а не h, как для напорных вод). В зоне турбулентного движения депрессионная линия будет сильно отклоняться от прямой книзу.

Определения $I_{кр}$ для опытного гидрогеологического куста могут быть выполнены следующими способами.

[1] При дальнейшей работе предусматривается составление номограммы, облегчающей совместное решение уравнений (13) и (14′).

I. Расчет по значению расхода, отвечающего переходу ламинарного движения в турбулентное.

Расчет $I_{кр}$ производится для опытного куста не только для центральной, но и для наблюдательных скважин, до которых при достаточно больших расходах распространилась зона турбулентного движения.

Определение величины $I_{кр}$ производится по формуле, по существу сходной с выражением (12),

$$I_{кр} = \frac{Q_т}{2\pi K r_m h_т},$$

где $Q_т$ — расход, отвечающий переходу ламинарного движения в турбулентное на расстоянии r_m оси опытной скважины, $Q_т$ соответствует переходной точке кривой зависимости между расходом и значением $S(2H - S)$ или $S(2H + S)$ для наблюдательной скважины, расположенной на расстоянии $r_т$ от оси опытной;

$h_т$ — высота уровня воды (измеряемого от водоупорного ложа), отвечающего переходу ламинарного движения в турбулентное на расстоянии r_m от оси опытного узла (для той же наблюдательной скважины).

Недостатки рассматриваемого способа определения величины $I_{кр}$ те же, что и для аналогичного способа по одиночной скважине. Однако для наблюдательных скважин результаты должны быть более точными вследствие меньших изменений высоты живого сечения потока подземных вод и более равномерного распределения скоростей потока в вертикальном сечении, что ведет к большему постоянству градиентов по вертикали.

II. Расчет величины $I_{кр}$ на основании основных уравнений притока воды к колодцу при развитии турбулентного движения в ограниченной зоне. Этот способ определения $I_{кр}$ аналогичен рассмотренному выше для одиночной скважины. Но при наличии в области ламинарного движения хотя бы одной наблюдательной скважины формула (13) может быть заменена следующей:

$$h_m^2 - h_т^2 = \frac{Q}{\pi K}(\ln r_m - \ln r_т),$$

где h_m — высота уровня воды в наблюдательной скважине, находящейся в области ламинарного движения на расстоянии r_m от оси опытной.

Таким образом, задача сводится к графическому решению уравнения (16), в котором величина R заменена значением r_m, а H — значением h_m.

Преимуществом данного способа определения $I_{кр}$ для опытного куста является отсутствие в расчетной формуле весьма ориентировочной величины радиуса влияния R.

При наличии наблюдательной скважины в зоне турбулентного движения возможно также исключение погрешностей за счет входных потерь напора и уменьшение погрешностей, являющихся следствием неоднородности водопроницаемости пород по вертикали и непостоянства входного градиента на различной глубине. В данном случае при расчете $I_{кр}$ динамический уровень h_0 в центральной скважине заменяется в формуле (14′) величиной h_1 — динамическим уровнем в наблюдательной скважине, находящейся в зоне турбулентного движения, а радиус

центральной скважины r_0 величиной r_1 — расстоянием этой наблюдательной скважины от оси опытной.

III. Определение величины $I_{кр}$ посредством нахождения границы зоны турбулентного движения по форме депрессионной линии. Преобразование депрессионной линии по способу С. А. Коля для безнапорных вод, рассмотренное выше, позволяет найти точку излома, отвечающую переходу ламинарного движения в турбулентное, теми же приемами, что и для напорных вод. Поскольку координаты этой точки равны $r_т$ и $h_т$, величина $I_{кр}$ может быть рассчитана по формуле (12).

Этот способ определения $I_{кр}$ очень прост и нагляден, но, так же как и для напорных вод, может оказаться недостаточно точным при малом числе наблюдательных скважин, затрудняющем надежное нахождение точки излома депрессионной линии.

2. Определение притока воды к водозабору для безнапорных вод

Определение притоков воды при радиальном в плане движении безнапорных вод и развитии турбулентного движения в ограниченной зоне основывается на зависимостях (12), (13) и (14′).

Предварительно необходимо убедиться в возможности возникновения турбулентного движения при данном понижении. Для этого производится расчет входного градиента по формуле линейного закона фильтрации

$$Q = KFI = 2\pi K h_0 r_0 I_{вх},$$

откуда

$$I_{вх} = \frac{Q}{2\pi K h_0 r_0}. \qquad (17)$$

Подставляя в выражение (17) значение Q, согласно формуле Дюпюи, после сокращений получим

$$I_{вх} = \frac{H^2 - h_0^2}{2r_0 (\ln R - \ln r_0) h_0} = \frac{S_0 (2H - S_0)}{2r_0 (\ln R - \ln r_0)(H - S_0)}. \qquad (17')$$

Турбулентное движение может возникнуть при $I_{вх} > I_{кр}$.

Расчет расхода Q производится следующим образом. Приравнивая друг другу значения Q, согласно выражениям (12) и (13), после сокращений получаем

$$2r_т h_т I_{кр} = \frac{H^2 - h_т^2}{\ln R - \ln r_т}$$

или

$$r_т (\ln R - \ln r_т) = \frac{H^2 - h_т^2}{2h_т I_{кр}}. \qquad (18)$$

Аналогично на основании выражений (12) и (14′)

$$r_т h_т I_{кр} = \frac{h_т^3 - h_0^3}{3\left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right) h_т}$$

или

$$r_т \left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right) = \frac{h_т^3 - h_0^3}{3h_т^2 I_{кр}}. \qquad (19)$$

Формулы (18) и (19) представляют два уравнения с двумя неизвестными $r_т$ и $h_т$. Для их решения следует применять графический способ. Целесообразно построить две кривые: 1) зависимости величин $h_т$ от $r_т$ по

уравнению (18), которое преобразуется в квадратные уравнения при различных значениях $r_т$; 2) зависимости между значениями $r_т$ и $h_т$ по уравнению (19). Для построения второй кривой, задаваясь различными значениями $h_т$, определяем величины $r_т$, решая квадратные уравнения, получающиеся из выражения (19). Пересечение указанных двух кривых дает точку, координаты которой равны искомым значениям $r_т$ и $h_т$.

Величина Q определяется по формуле (12), в которую подставляются полученные значения $r_т$ и $h_т$. Для контроля рекомендуется также параллельно рассчитать Q по формулам (13) и (14).

3. Определение понижений уровня в колодцах при заданном расходе воды для безнапорных вод

Для расчета понижений уровня в колодцах также служат уравнения (12), (13) и (14′).

Предварительно определяем величину $I_{вх}$ по формуле (17). Турбулентное движение имеет место при $I_{вх} > I_{кр}$.

После того как установлена возможность развития турбулентного движения, определяем величины $r_т$ и $h_т$ путем совместного решения уравнений (12) и (13). Для этого целесообразно, определив $h_т$ из уравнения (12), подставить полученное выражение в формулу (13). После преобразований

$$\ln R - \ln r_т + \frac{Q}{4\pi K r_т^2 I_{кр}^2} = \frac{\pi K H^2}{Q}. \qquad (20)$$

Величину $r_т$ определяем из уравнения (20) методом подбора. Подстановка величины $r_т$ в уравнение (12) дает значение $h_т$. Уравнения (12) и (13) можно также решить совместно графическим способом.

Подставляя полученные значения $r_т$ и $h_т$ в уравнение (14′), определяем величину

$$h_0 = \sqrt[3]{h_т^3 - \frac{3}{2}\frac{Q h_т}{\pi K}\left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right)}.$$

Искомая величина понижения $S_0 = H - h_0$.

V. Уравнения притока воды к колодцу и соответствующие гидрогеологические расчеты для радиальных потоков подземных вод при переходе напорного движения в безнапорное и развития турбулентного движения в ограниченной зоне

При притоке воды в буровые скважины, колодцы и, особенно, котлованы и горные выработки нередко в ближайшей к водозабору части депрессионной воронки имеет место переход напорного движения в безнапорное.

Значительно реже подобные условия могут наблюдаться при опытных откачках, например для водоносных горизонтов с небольшим напором.

При образовании зоны турбулентного движения в рассматриваемых условиях может быть два случая.

1) зона турбулентного движения меньше зоны безнапорного движения подземных вод, т. е. располагается целиком внутри последней; тогда $r_т < r_б$, где $r_б$ — радиус зоны безнапорного движения (рис. 5, *а*);

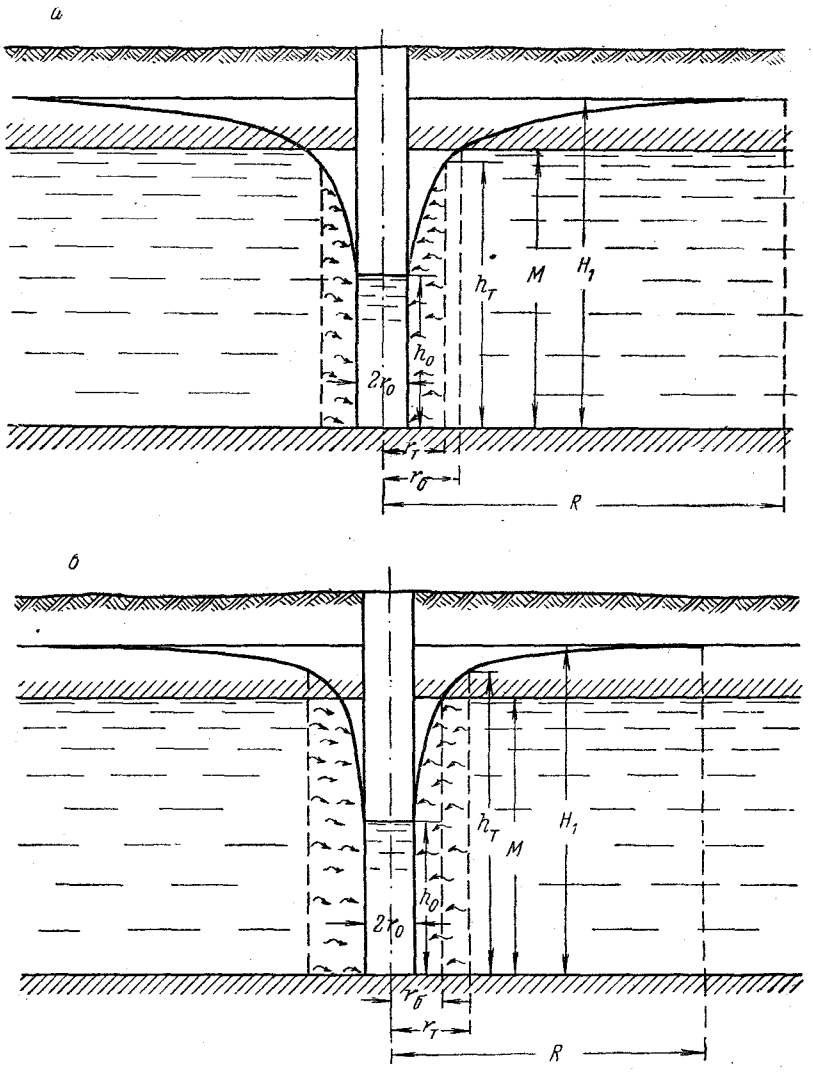


Рис. 5. Схема развития турбулентного движения при откачке из колодца и переходе напорного движения в безнапорное:

а — зона турбулентного движения меньше зоны безнапорного движения — $r_т < r_б$; *б*) зона турбулентного движения больше зоны безнапорного движения — $r_т > r_б$; h_0 — динамический уровень воды в колодце; $h_т$ — уровень подземных вод на границе ламинарного и турбулентного движений; H_1 — пьезометрический уровень (по отношению к водоупорному ложу); M — мощность водоносного горизонта; r_0 — радиус колодца; $r_т$ — радиус зоны турбулентного движения; $r_б$ — радиус зоны безнапорного движения; R — радиус влияния

2) зона турбулентного движения больше зоны безнапорного движения, т. е. захватывает часть области напорного движения подземных вод; тогда $r_т > r_б$ (рис. 5, *б*).

Приводим расчетные зависимости для обоих случаев.

Случай I. $r_т < r_б$ (рис. 5, *а*). В данном случае имеют место следующие зависимости:

$$Q = 2\pi K r_т h_т I_{кр};$$

$$H_1 - M = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_б); \tag{21}$$

$$M^2 - h_т^2 = \frac{Q}{\pi K}(\ln r_б - \ln r_т); \tag{22}$$

$$h_т^3 - h_0^3 = \frac{3}{2}\frac{Q}{\pi K} h_т\left(\frac{r_т}{r_0} - 1\right),$$

где H_1 — высота пьезометрического уровня над водоупорным ложем.

Остальные обозначения прежние.

Первая из приведенных зависимостей та же, что и для безнапорных вод — формула (12). Зависимость (21) представляет формулу Дюпюи для области ламинарного движения в напорных условиях. Зависимость (22) аналогична выражению (13) и представляет формулу Дюпюи для части области ламинарного движения, где движение подземных вод безнапорное. Последняя зависимость представляет формулу А. А. Краснопольского — уравнение (14′).

Складывая выражение (21) после умножения правой и левой части его на величину $2M$ с выражением (22), после несложных преобразований получаем

$$M(2H_1 - M) - h_т^2 = \frac{Q}{\pi K}(\ln R - \ln r_т). \tag{23}$$

Таким образом, для расчетов в рассматриваемом случае можно воспользоваться зависимостями (12), (23) и (14′).

Выражения (23) и (13) отличаются друг от друга только первым членом левой части, не заключающим неизвестных. В зависимости (23) этот член равен $M(2H_1 - M)$, а в зависимости (13) — H^2.

Следовательно, все расчеты для рассматриваемого случая те же, что и для безнапорного движения подземных вод, лишь величина H^2 в формулах для безнапорных вод должна быть заменена значением $M(2H_1 - M)$.

Случай II. $r_т > r_б$ (рис. 5, *б*). Для расчетов можно использовать следующие зависимости:

$$Q = 2\pi KMr_т I_{кр};$$

$$H_1 - h_т = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_т); \tag{24}$$

$$h_т - M = \left(\frac{Q}{2\pi K_к M}\right)^2\left(\frac{1}{r_б} - \frac{1}{r_т}\right); \tag{25}$$

$$M^3 - h_0^3 = 3\left(\frac{Q}{2\pi K_к}\right)^2\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_б}\right). \tag{26}$$

Первая из указанных зависимостей та же, что и для напорных вод, — формула (3). Зависимость (24) представляет формулу Дюпюи

для области ламинарного движения при напорном движении, зависимость (25) — формулу А. А. Краснопольского для части зоны турбулентного движения, находящейся в условиях напорного движения подземных вод. Зависимость (26) представляет формулу А. А. Краснопольского для остальной части зоны турбулентного движения, захватывающей всю область безнапорного движения подземных вод. Эта зависимость аналогична формуле (14).

Сложим выражения (24), (25) и (26), разделив предварительно обе части последнего на $3M^2$. После несложных преобразований получаем

$$H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2} = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_т) + \left(\frac{Q}{2\pi K_к M}\right)^2\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_т}\right).$$

Заменяя в полученной формуле значение $K_к$ его выражением через K, согласно формуле (4), являющейся следствием зависимости (3), после преобразований имеем

$$H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2} = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right). \qquad (27)$$

Формула (27) аналогична приведенному выше выражению (5). Правые части формул (5) и (27) одинаковы, в левой части формулы (27) вместо значения S_0 стоит величина

$$H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2}.$$

Задача определения водопритоков или критического градиента по данным опытных работ, как показывает формула (27), приводится к аналогичным задачам для напорного движения подземных вод. При этом формула (27) не заключает неизвестных в левой части, поэтому для расчетов могут быть использованы приведенные ранее зависимости и номограммы после замены величины S_0 численным значением левой части формулы (27).

При определении динамического уровня h_0, при заданном водопритоке Q, в формулу (27), согласно формуле (3′), следует подставить значение $r_т$ и решить полученное уравнение относительно h_0, что дает

$$h_0 = \sqrt[3]{3MH_1^2 - 2M^3 - \frac{3QM}{2\pi K}\left(\ln\frac{2\pi KMRI_{кр}}{Q} + \frac{Q}{2\pi KMr_0I_{кр}} - 1\right)}. \qquad (28)$$

Для решения вопроса, о том, имеет ли место первый случай, когда $r_т < r_б$, или второй, когда $r_т > r_б$, рассмотрим условия, наблюдаемые при совпадении зон безнапорного и турбулентного движений, т. е. при $r_т = r_б$.

Величина градиента $I_г$ на границе зон турбулентного и ламинарного движений, являющейся в данных условиях одновременно границей напорного и безнапорного движений подземных вод, равна критическому градиенту $I_{кр}$ т. е. $I_г = I_{кр}$.

Величину $I_г$ проще рассчитать при известном расходе воды Q, что имеет место при расчетах характеристики водопроницаемости по данным опытных откачек или определении динамического уровня по заданному расходу. При указанных условиях $I_г$ рассчитываем на основании формулы Дюпюи для области напорного движения

$$H_1 - M = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_б), \qquad (29)$$

откуда получаем

$$\ln r_б = \ln R - \frac{2\pi KM(H_1 - M)}{Q}.$$

В соответствии с формулой (3)

$$I_г = \frac{Q}{2\pi KMr_б},$$

откуда

$$\ln I_г = \ln \frac{Q}{2\pi KM} - \ln r_б.$$

Подстановка значения $r_б$ в последнее выражение дает

$$\ln I_г = \frac{2\pi KM(H_1 - M)}{Q} + \ln \frac{Q}{2\pi KM} - \ln R. \qquad (30)$$

Зависимость (26) для рассматриваемого случая совпадения зон напорного и турбулентного движений остается неизменной. Преобразуя эту зависимость заменой величины $K_к$ ее выражением через K, согласно формуле (4), подобно тому, как это сделано при выводе формулы (27), и учитывая, что $r_б = r_т$, получаем выражение, аналогичное формуле (14′),

$$M^3 - h_0^3 = \frac{3}{2}\frac{QM}{\pi K}\left(\frac{r_б}{r_0} - 1\right). \qquad (31)$$

Разделив полученное выражение на значение $\ln R - \ln r_б$, полученное по формуле (29), после сокращений получаем

$$\frac{r_б - r_0}{r_0(\ln R - \ln r_б)} = \frac{M^3 - h_0^3}{3M^2(H_1 - M)}. \qquad (32)$$

Уравнение (32) дает возможность определить величину $r_б$ методом подбора.

Величины $I_г$ и $r_б$ связаны следующей зависимостью:

$$I_г = \frac{Q}{2\pi KMr_б}.$$

Подставляя в эту зависимость значение $\frac{Q}{2\pi KM}$ из формулы (29), после сокращений получаем формулу для расчета $I_г$ при неизвестной величине Q:

$$I_г = \frac{H_1 - M}{r_б(\ln R - \ln r_б)}. \qquad (33)$$

Для решения поставленного вопроса о соотношении радиусов зон турбулентного и безнапорного движений подземных вод необходимо сравнить полученные значения $I_г$ с величиной $I_к$.

При $I_г < I_{кр}$ имеем, очевидно, случай I, когда $r_т < r_б$.

При $I_г > I_{кр}$ имеем случай II когда $r_т > r_б$.

Для переходного случая, т. е. при $I_г = I_{кр}$, расчеты водопритоков после определения величины $r_т$ могут быть произведены по формуле (29), а расчеты динамического уровня при заданном расходе — по формуле (31).

VI. Примеры расчетов

Пример 1. Определение K и $I_{кр}$ по данным опытной кустовой откачки.

Водоносный горизонт напорный в известняках Михайловского горизонта окской свиты нижнего карбона (западное крыло Подмосковного бассейна) мощностью 8 *м*.

Данные откачки

Номер скважины	r, *м*	Первое понижение, *м* (Q = 1080 *м³/сутки*)	Второе понижение, *м* (Q = 1538 *м³/сутки*)
1 (центр)	0,1	3,15 (S_0)	4,90 (S_0)
3	25,0	0,27	0,37
5	75,0	0,18	0,25

Даже без построения депрессионной линии по методу С. А. Коля на основании данных таблицы можно заключить, что наблюдательные скважины при обоих понижениях находились в области ламинарного движения.

Зависимость расхода от понижения в центральной скважине и величина S_0 указывают на развитие турбулентного движения в зоне, расположенной между центральной и наблюдательной скважиной № 3.

1. Рассчитываем коэффициент фильтрации при ламинарном движении по данным наблюдательных скважин № 3 и 5 (по формуле Дюпюи).

По данным первого понижения

$$K = \frac{0{,}366 \cdot 1080\,(\lg 75 - \lg 25)}{8\,(0{,}27 - 0{,}18)} = 261 \text{ } м/сутки.$$

По данным второго понижения

$$K = \frac{0{,}366 \cdot 1538\,(\lg 75 - \lg 25)}{8\,(0{,}37 - 0{,}25)} = 278 \text{ } м/сутки.$$

Принимаем среднее значение $K = 270$ *м/сутки*.

2. Определяем $I_{кр}$ подбором по формуле (8′), а также путем определения $\rho = \frac{r_т}{r_0}$ по номограмме рис. 2.

По данным первого понижения при $S_m = 0{,}27$ *м*; $r_m = 25$ *м* (скважина № 3)

$$\frac{Q}{2\pi KMr_0}\frac{1}{I_{кр}} - \ln\frac{1}{I_{кр}} = \frac{2\pi KM\,(S_0 - S_m)}{Q} - \ln\frac{2\pi KMr_m}{Q} + 1;$$

$$\frac{1080}{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 0{,}1}\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} =$$

$$= \frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8\,(3{,}15 - 0{,}27)}{1080} - 2{,}3\lg\frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 25}{1080} + 1;$$

$$0{,}795\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} = 12{,}55 \cdot 2{,}88 - 2{,}3\lg 314 + 1;$$

$$\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}9\frac{1}{I_{кр}} = 45{,}6 - 7{,}23 + 1{,}25 = 39{,}7.$$

Подбор дает $\frac{1}{I_{кр}} = 44{,}5$, $I_{кр} = 0{,}0225$.

По данным первого понижения при $S_m = 0{,}18$ *м*; $r_m = 75$ *м* (скважина № 5)

$$0{,}795\,\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} = 12{,}55\,(3{,}15 - 0{,}18) - 2{,}3\lg 942 + 1;$$

$$\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}9\lg\frac{1}{I_{кр}} = 47 - 8{,}6 + 1{,}25 = 39{,}7.$$

Попрежнему $I_{кр} = 0{,}0225$.

По номограмме рис. 2 при

$$A = 1 + \frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8\,(3{,}15 - 0{,}47)}{1080} - 2{,}3\lg\frac{25}{0{,}1} =$$

$$= 1 + 36{,}2 - 5{,}5 = 31{,}7$$

получаем

$$\rho = \frac{r_т}{r_0} = 35; \quad r_т = 35 \cdot 0{,}1 = 3{,}5\ м.$$

По формуле (3)

$$I_{кр} = \frac{1080}{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 3{,}5} = 0{,}0228.$$

По данным второго понижения при $S_m = 0{,}37$; $r_m = 25$ *м* (скважина № 3)

$$\frac{1538}{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 0{,}1}\,\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} =$$

$$= \frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8\,(4{,}90 - 0{,}37)}{1538} - 2{,}3\lg\frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 25}{1538} + 1;$$

$$1{,}132\,\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} = 8{,}84 \cdot 4{,}53 - 2{,}3\lg 8{,}84 \cdot 25 + 1;$$

$$\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}03\lg\frac{1}{I_{кр}} = 35{,}2 - 2{,}03\lg 221 + 0{,}88 = 31{,}3;$$

$$\frac{1}{I_{кр}} = 34{,}4; \quad I_{кр} = 0{,}029.$$

По данным второго понижения при $S_m = 0{,}25$ *м*; $r_m = 75$ *м* (скважина № 5)

$$1{,}132\,\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}3\lg\frac{1}{I_{кр}} = 8{,}84\,(4{,}90 - 0{,}25) - 2{,}3\lg 8{,}84 \cdot 75 + 1;$$

$$\frac{1}{I_{кр}} - 2{,}03\lg\frac{1}{I_{кр}} = 36{,}3 - 2{,}03\lg 663 + 0{,}88 = 31{,}4.$$

Значение $I_{кр}$ практически то же — 0,029.

По номограмме рис. 2 при

$$A = 1 + \frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8\,(4{,}90 - 0{,}37)}{1538} - 2{,}3\lg\frac{25}{0{,}1} = 1 + 40 - 5{,}5 = 35{,}5$$

получаем

$$\rho = \frac{r_т}{r_0} = 39; \quad r_т = 39 \cdot 0{,}1 = 3{,}9\ м.$$

По формуле (3)

$$I_{кр} = \frac{1538}{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 3{,}9} = 0{,}029.$$

Принимаем среднее значение $I_{кр} = 0{,}027$.

Таким образом, характеристиками водонепроницаемости михайловских известняков являются

$$K = 270 \text{ м/сутки} \text{ и } I_{кр} = 0{,}027.$$

Величина коэффициента водопроницаемости при турбулентном движении, подчиняющемся закону Шези, согласно формуле (1),

$$K_к = K\sqrt{I_{кр}}; \quad K_к = 270\sqrt{0{,}027} = 44{,}4 \text{ м/сутки}.$$

Пример 2. Определение притока воды в шахтный ствол.

Определим приток воды из михайловских известняков, рассмотренных в предыдущем примере.

Диаметр ствола $2r_0 = 6$ м; понижение при откачке $S_0 = 15$ м; радиус влияния принимаем $R = 1000$ м (при кустовой откачке $R = 700$ м).

Характеристики водопроницаемости известняков, согласно предыдущему примеру,

$$K = 270 \text{ м/сутки}, \quad I_{кр} = 0{,}027.$$

1. Определяем радиус зоны турбулентного движения по формуле (10):

$$r_т\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right) = \frac{S_0}{I_{кр}};$$

$$r_т\left(2{,}3 \lg 1000 - 2{,}3 \lg r_т + \frac{r_т}{3} - 1\right) = \frac{15}{0{,}027};$$

$$r_т\left(5{,}9 - 2{,}3 \lg r_т + \frac{1}{3} r_т\right) = 555.$$

Подбор дает $r_т = 37{,}6$ м.

Кроме того, определяем по номограмме рис. 3 величину $\rho = \frac{r_т}{r_0}$. Для этого рассчитываем

$$x = \frac{S_0}{r_0 I_{кр}} = \frac{15}{3 \cdot 0{,}027} = 185$$

и

$$\frac{R}{r_0} = \frac{1000}{3} = 333{,}3.$$

Интерполяция по номограмме дает $\rho = 12{,}5$, откуда $r_т = 12{,}5 \cdot 3 = 37{,}5$ м.

2. Определяем расход воды по формуле (3):

$$Q = 2\pi K M r_т I_{кр}; \quad Q = 6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 37{,}6 \cdot 0{,}027 = 13\,756 \text{ м}^3/\text{сутки},$$

или 575 м³/час.

Для контроля рассчитываем расход воды также по формуле (5′):

$$Q = \frac{2\pi K M S_0}{\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1}; \quad Q = \frac{6{,}28 \cdot 260 \cdot 8 \cdot 15}{2{,}3\,(\lg 1000 - \lg 37{,}6) + \frac{37{,}6}{3} - 1};$$

$Q = 13\,800$ м³/сутки — практически та же величина.

3. Для сравнения производим расчет притока воды по формуле Дюпюи без учета возникновения зоны турбулентного движения:

$$Q = \frac{2{,}73KMS_0}{\lg R - \lg r_0}; \quad Q = \frac{2{,}73 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 15}{\lg 1000 - \lg 3} = 35\,000 \ м^3/сутки.$$

Значение расхода получилось в 2,5 раза больше, чем при правильном расчете с учетом развития турбулентного движения.

4. Произведем более точный расчет притока воды, учитывая переход напорного движения в безнапорное у поверхности шахтного ствола.

Высоту высачивания h_0 принимаем равной 2 *м*. При понижении на 15 *м* $H_1 = 15 + 2 = 17$ *м*.

Для решения вопроса о соотношении размеров зон турбулентного и напорного движений определяем величину градиента $I_г$ на границе областей напорного и безнапорного движений при $r_б = r_т$, т. е. для случая совпадения зон безнапорного и турбулентного движений.

Определяем величину $r_б$ подбором по формуле (32):

$$\frac{r_б - r_0}{r_0(\ln R - \ln r_б)} = \frac{M^3 - h_0^3}{3M^2(H_1 - M)}; \quad \frac{r_б - 3}{3(\lg 1000 - \lg r_б)} = \frac{2{,}3(8^3 - 2^3)}{3 \cdot 8^2(17 - 8)};$$

$$\frac{r_б - 3}{\lg 1000 - \lg r_б} = 2{,}01.$$

Подбор дает $r_б \approx 7{,}3$ *м*.

Рассчитываем значение $I_г$ по формуле (33):

$$I_г = \frac{H_1 - M}{r_б(\ln R - \ln r_б)}; \quad I_г = \frac{17 - 8}{7{,}3 \cdot 2{,}3(\lg 1000 - \lg 7{,}3)} = 0{,}25.$$

Поскольку $I_г > I_{кр}$ ($I_{кр} = 0{,}027$), расчет следует вести по схеме для второго случая, отвечающего $r_т > r_б$.

Предварительно рассчитываем величину $r_т$ по формуле (10′) после замены величины S_0 численным значением алгебраической суммы:

$$H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2} = N;$$

$$N = 17 - \frac{2}{3}8 - \frac{1}{3}\frac{2^3}{8^2} = 11{,}63 \ м;$$

$$r_т\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right) = \frac{N}{I_{кр}};$$

$$r_т\left(2{,}3\lg 1000 - 2{,}3\lg r_т + \frac{r_т}{3} - 1\right) = \frac{11{,}63}{0{,}027} = 431.$$

Подбор дает $r_т = 32{,}6$ *м*.

Аналогичный результат получаем, пользуясь номограммой рис. 3.

5. Определяем расход воды Q по формуле (3):

$$Q = 2\pi KMr_т I_{кр};$$

$$Q = 6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 31{,}6 \cdot 0{,}027 = 11\,950 \ м^3/сутки.$$

Для контроля производим расчет расхода воды по формуле (27):

$$Q = \frac{2\pi KM\left(H_1 - \frac{2}{3}M - \frac{1}{3}\frac{h_0^3}{M^2}\right)}{\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1};$$

$$Q = \frac{6{,}28 \cdot 270 \cdot 8 \cdot 11{,}63}{2{,}3 \lg 1000 - 2{,}3 \lg 32{,}6 + \frac{32{,}6}{3} - 1} = 11\,930 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Величина расхода получилась несколько меньшей (на 13%), чем при менее точном расчете, который не учитывал перехода напорного движения подземных вод в безнапорное. Объясняется это тем, что в зоне безнапорного движения уменьшается высота живого сечения потока подземных вод.

Пример 3. Определение понижения уровня воды в скважине при заданном расходе.

Водоносный горизонт — напорный в лихвинских доломитах (Селижаровский район). Характеристики водопроницаемости пород по данным исследований, произведенных в связи с водопонизительными работами, следующие: $K = 60$ *м/сутки*; $I_{кр} = 0{,}05$. Мощность водоносного горизонта 30 *м*. Требуемый расход воды 2400 *м*³/*сутки* (100 *м*³/*час*.). Радиус рабочей части скважины 0,1 *м*. Скважина совершенная. Величину радиуса влияния принимаем 500 *м*.

1. Определяем возможность появления турбулентного движения. Для этого рассчитываем величину входного градиента $I_{вх}$ для условий ламинарного движения по формуле (9):

$$I_{вх} = \frac{Q}{2\pi KMr_0}; \quad I_{вх} = \frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 0{,}1} = 2{,}12.$$

$$I_{вх} > I_{кр}.$$

Следовательно, турбулентное движение будет наблюдаться.

2. Рассчитываем радиус зоны турбулентного движения по формуле (3):

$$r_т = \frac{Q}{2\pi KMI_{кр}}; \quad r_т = \frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 0{,}05} = 4{,}25 \text{ м}.$$

3. Определяем понижения уровня в скважине по формуле (5):

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln R - \ln r_т + \frac{r_т}{r_0} - 1\right);$$

$$S_0 = \frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30}\left[2{,}3\,(\lg 500 - \lg 4{,}25) + \frac{4{,}25}{0{,}1} - 1\right] = 9{,}8 \text{ м}.$$

Можно рассчитать также величину S_0 непосредственно по формуле (11):

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\frac{Q}{2\pi KMr_0 I_{кр}} + \ln\frac{2\pi KMRI_{кр}}{Q} - 1\right);$$

$$S_0 = \frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30}\left(\frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}05} + 2{,}3 \lg\frac{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 500 \cdot 0{,}05}{2400} - 1\right);$$

$$S_0 = 9{,}8 \text{ м}.$$

4. Для сравнения рассчитываем S_0', не учитывая развития турбулентного движения (по формуле Дюпюи):

$$S_0' = \frac{Q}{2\pi KM}(\ln R - \ln r_0);$$

$$S_0' = \frac{2400}{6{,}28 \cdot 60 \cdot 30} 2{,}3\,(\lg 500 - \lg 0{,}1) = 1{,}8 \text{ м};$$

$$S_0' = 1{,}8 \text{ м}.$$

Несмотря на небольшую величину зоны турбулентного движения по сравнению с общими размерами депрессионной воронки, разница между значениями S_0 и S_0' получилась значительная (8 м).

Заключение

1. Разработанные методы гидрогеологических расчетов для радиального движения подземных вод к буровым скважинам, колодцам и другим водозаборам исходят из того, что зона турбулентного движения имеет почти всегда ограниченные размеры, захватывая только часть депрессионной воронки. Поэтому предлагаемые расчетные зависимости являются комбинированными, основанными на формуле А. А. Краснопольского для внутренней части депрессионной воронки, где имеет место турбулентное движение, и формуле Дюпюи для внешней области, где наблюдается движение ламинарное.

Для груботрещиноватых и закарстованных пород рекомендуемые методы расчетов во многих случаях позволяют избежать грубых ошибок, возникающих без учета ограниченных размеров зоны турбулентного движения или основанных только на линейном законе фильтрации.

2. В качестве основных характеристик водопроницаемости горных пород при возможном развитии турбулентного движения подземных вод предлагается принимать: коэффициент водопроницаемости при ламинарном движении K и критический градиент $I_{кр}$, отвечающий переходу ламинарного движения в турбулентное.

3. При выводе предлагаемых формул для зоны турбулентного движения подземных вод принята квадратичная зависимость (формула Шези), а переходная от ламинарного к турбулентному зона движения подземных вод не принимается во внимание.

Это основано на следующих соображениях:

а) квадратичная зависимость достаточно близко отражает существующие закономерности турбулентного движения подземных вод в груботрещиноватых и закарстованных породах (для которых почти исключительно и предназначены предлагаемые схемы расчета);

б) переходная от ламинарного к турбулентному зона смешанного движения в радиальном потоке имеет относительно небольшие размеры;

в) пользование другими нелинейными зависимостями, например известной формулой Смрекера, принципиально менее обосновано и вызывает большие затруднения при определении их параметров.

Использование квадратичной зависимости для обычных гидрогеологических расчетов при учете ограниченных размеров зоны турбулентного движения должно дать результаты значительно более точные, чем существующая практика применения формул А. А. Краснопольского или Смрекера для всей области депрессии или только формулы Дюпюи при наличии зоны турбулентного движения.

Наконец, необходимо указать, что формула Смрекера и другие нелинейные зависимости при учете развития турбулентного движения в ограниченной зоне вызывают необходимость очень сложных расчетов.

4. Расчетные схемы и формулы, приведенные в настоящей работе, позволяют решать следующие задачи:

а) установление основных показателей водопроницаемости горных пород K и $I_{кр}$ по данным опытных полевых гидрогеологических работ (откачек, наливов и нагнетаний);

б) расчет притока воды в скважины, колодцы, а также при применении схемы «большого колодца» — в горные выработки и котлованы;

в) определение динамического уровня в скважинах и колодцах при заданном расходе воды.

Расчеты для напорного движения подземных вод являются сравнительно простыми, а при пользовании приведенными номограммами требуют немногим более времени, чем расчеты, производимые общепринятыми методами. Для безнапорного движения подземных вод и условий перехода напорного движения в безнапорное расчеты значительно усложняются, но не представляют принципиальных затруднений.

5. Определение основных характеристик водопроницаемости горных пород, учитывающих условия развития турбулентного движения, предъявляет повышенные требования к качеству опытных гидрогеологических работ. В первую очередь необходима тщательная регулировка расхода и динамического уровня воды, обеспечивающая их постоянство во время опыта, а также повышенная точность измерений. В ряде случаев для получения надежных результатов может потребоваться и увеличение числа ступеней напора (понижений или повышений уровня в опытной скважине).

Наиболее надежные результаты могут быть получены по данным опытных кустовых откачек или наливов с достаточным числом наблюдательных скважин.

Автор просит гидрогеологов прислать свои замечания по настоящей работе и данные расчетов, произведенных по предлагаемым схемам для конкретных случаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володько И. Ф. К методике лабораторного изучения движения подземных вод в трещиноватых породах. «Гидрогеология и инженерная геология», 1941, № 8.
2. Гиринский Н. К. К расчету движения подземных вод к скважинам. «Гидрогеология и инженерная геология», 1947, № 9.
3. Керкис Е. Е. К вопросу о движении подземных вод в трещиноватых породах. Записки Ленинградского горного института, 1948, т. XXII.
4. Краснопольский А. А. Грунтовые и артезианские колодцы. «Горный журнал», 1912, № 1, 2, 3
5. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. Госэнергоиздат, 1951.
6. Коль С. А. Графоаналитический метод определения коэффициента фильтрации горных пород по результатам откачки воды на фильтрационном участке и некоторые вопросы, связанные с его применением. Сб. Гидроэнергопроект, 1941, № 9.
7. Силин-Бенчурин А. И. Специальная гидрогеология. Госгеолиздат, 1951.
8. Троянский С. В. Теоретические основы осушения шахтных полей и дальнейшее развитие методов осушения в условиях Подмосковного бассейна. Доклад на расширенном заседании технического Совета Министерства угольной промышленности СССР. Углетехиздат, 1952.
9. Храмушев А. С. Теоретические основы графоаналитического метода определения коэффициента водопроводимости трещиноватых и грубо обломочных пород. «Гидрогеология и инженерная геология», 1941, № 8.