Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДОЗАБОРОВ В ЗОНЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Н. А. Ярцев

До недавнего времени при расчете водозаборов, закладываемых в зоне выветривания, предполагалась фильтрационная однородность массивов трещиноватых горных пород; уменьшение же их водопроницаемости с глубиной не учитывалось, что приводило к неизбежным ошибкам. Л. В. Боревский предложил методику расчета притока воды к скважине, исходя из условия, что коэффициент фильтрации горной породы в зоне выветривания уменьшается с глубиной по линейному закону [1]. Это позволило значительно уточнить расчеты водозаборов.

Гидрогеологические исследования в Криворожском железорудном бассейне [3] показали, что коэффициенты фильтрации горных пород в зоне выветривания изменяются с глубиной не по линейному, а более сложному закону, в связи с чем возникла необходимость пересмотреть вопрос о методике гидрогеологического расчета водозаборов, закладываемых в грунтовый водоносный горизонт зоны выветривания. Отличительной чертой этой зоны является уменьшение водопроницаемости кристаллических горных пород с глубиной [2]. Характер этого изменения изучен еще недостаточно и не описан математически, без чего обоснованный расчет рассматриваемых водозаборов невозможен.

Установить закономерности изменения водопроницаемости горных пород с глубиной в зоне выветривания из-за недостатков применяемой методики гидрогеологических исследований довольно сложно. Обычно используется метод так называемых зональных откачек воды из скважин, когда зона разбивается по высоте на ряд интервалов, каждый из которых опробуется откачкой. Коэффициенты фильтрации вычисляются по обычной методике, как для однородных пород. Получаемые величины являются средними для опробованных интервалов и при линейном законе изменения водопроницаемости по глубине соответствуют значению коэффициента фильтрации на уровне середины интервала. При криволинейной зависимости получаемые из откачек средние значения коэффициентов фильтрации нельзя отнести к серединам опробованных интервалов. Точка, к которой следует относить эти значения, отклоняется от середины интервала опробования тем больше, чем больше его длина. Поэтому длина интервалов опробования должна быть достаточно малой и по возможности одинаковой. В то же время она должна быть достаточно большой, чтобы фильтрационная неоднородность массива трещиноватых горных пород не влияла на результаты отдельных опытов. При длине интервалов, сопоставимой с линейными размерами элементов неоднородности массива трещиноватых горных пород, неизбежно сильное колебание определяемых величин коэффициентов фильтрации даже для одних и тех же глубин. Чтобы неодно-

родность пород не влияла на результаты отдельных опытов, длина интервалов опробования должна превышать максимальный линейный размер элементов неоднородности в 7—10 раз. Под элементом неоднородности понимается блок пород, отсекаемый проницаемыми для воды трещинами. Максимальный линейный размер элемента неоднородности — это максимальное расстояние между трещинами.

Мы попытались оценить необходимую величину интервала опробования для определения коэффициентов фильтрации при откачках воды из скважин, пройденных в криворожских доломитовых и кальцито-доломитовых мраморах. Для этого были изучены расстояния между трещинами, полностью поглощавшими промывочную жидкость при колонковом бурении. В зависимости от глубины интервалов бурения, среднее расстояние изменялось в следующих пределах, *м*:

Отметка середины интервала	+25	0	—25	—200
Среднее расстояние между трещинами . . .	7,0	9,1	11,5	81,5

Из этих данных следует, что длина интервалов опробования должна была бы изменяться от 50—70 до 570—815 *м*. Однако при такой длине интервалов установить закономерности изменения водопроницаемости по глубине зоны выветривания невозможно. Необходимо разбивать зону выветривания по высоте на ряд интервалов так, чтобы каждый из них был опробован не одной, а несколькими откачками воды из скважин. Суммарная длина опробуемых зон при оценке водопроницаемости каждого интервала должна в 7—10 раз превышать максимальный линейный размер элементов неоднородности трещиноватой горной породы. По данным откачек воды вычисляются поинтервальные (средневзвешенные по длине опробованных зон) значения коэффициентов фильтрации

$$\overline{K} = \frac{K_1 l_1 + K_2 l_2 + \cdots + K_n l_n}{l_1 + l_2 + \cdots + l_n}, \ м^3/сутки, \qquad (1)$$

где K_1, K_2, . . ., K_n — коэффициенты фильтрации, полученные из отдельных опытов, *м/сутки*; l_1, l_2, . . ., l_n — длины опробованных зон в отдельных опытах, *м*.

По этой методике были обработаны результаты откачек воды из скважин, пройденных в зоне выветривания метаморфических и магматических горных пород Криворожского железорудного бассейна (см. таблицу). Анализ полученных материалов показал, что функция $\overline{K} = f(\overline{z})$, где $\overline{z}$ — средняя глубина интервалов опробования, не является линейной, как

Показатели результатов откачек из пород Криворожского бассейна

Порода	Число откачек	Суммарная длина интервалов опробования, *м*	Значение $\lg \overline{K}$	Коэффициент корреляции
Доломитовые и кальцито-доломитовые мраморы	40	4113,5	$-0{,}00569\overline{z}+1{,}982$	$-0{,}97\pm0{,}02$
Метаморфизованные конгломераты и песчаники	21	6084	$-0{,}00199\overline{z}-1{,}277$	$-0{,}81\pm0{,}13$
Кварцево-биотитовые и кварцево-графитито-биотитовые сланцы	24	3864,2	$-0{,}00836\overline{z}+0{,}017$	$-0{,}95\pm0{,}04$
Гнейсы, граниты, мигматиты	29	2323,3	$-0{,}00537\overline{z}-0{,}977$	$-0{,}98\pm0{,}02$

полагал Л. В. Боревский [1]. Поэтому для каждого типа пород нами были построены графики $\lg \bar{K} = f(\bar{z})$ (рис. 1), из которых видно, что для всех типов изученных пород эту зависимость можно достаточно точно аппроксимировать прямой. Корреляционный анализ также подтвердил, что между величинами $\lg \bar{K}$ и $\bar{z}$ существует тесная и очень тесная корреляционная связь (см. таблицу). После перехода к натуральным логарифмам

$$\ln \bar{K} = -\alpha \bar{z} + \ln \beta, \quad (2)$$

где α и β — некоторые постоянные для данной горной породы и тектонических условий рассматриваемого участка.

При $\bar{z} = 0$ $\beta = K_0$ (K_0 — коэффициент фильтрации горной породы на поверхности). Подставив в уравнение (2) значение β и решив его относительно $\bar{K}$, получим

$$\bar{K} = K_0 e^{-\alpha \bar{z}}, \quad (3)$$

где α — показатель, характеризующий скорость изменения коэффициента фильтрации по глубине, $1/м$.

Зависимость (3) характерна для процессов так называемого органического роста, к числу которых относится и выветривание.

Рассмотрим условия фильтрации воды к вертикальному водозабору, вскрывающему безнапорный водоносный горизонт на глубину H от поверхности подземных вод (рис. 2). В нижней части опробованной зоны коэффициент фильтрации горной породы обычно значительно меньше среднего значения его в интервале откачки, вследствие чего через забой выработки можно условно провести практический водоупор. Согласно закону Дарси, расход откачиваемой воды

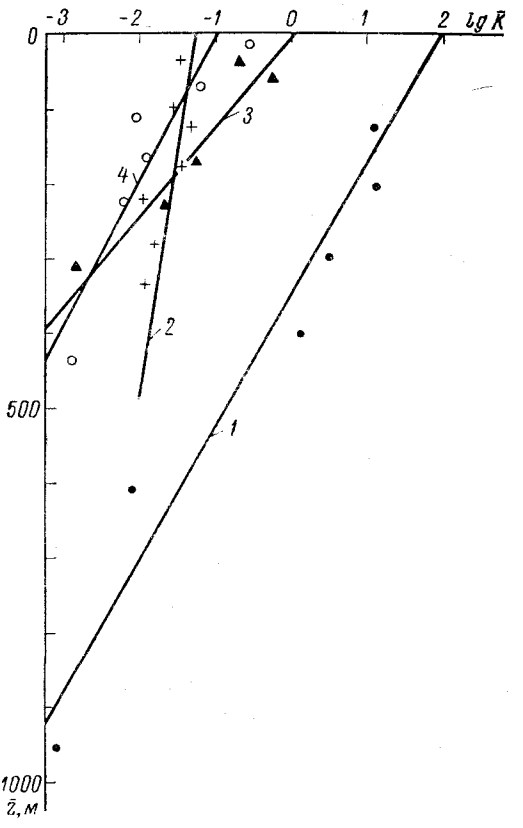


Рис. 1. Зависимость $\lg \bar{K}$ от $\bar{z}$:
1 — доломитовые и кальцито-доломитовые мраморы; *2* — метаморфизованные конгломераты и песчаники; *3* — кварцево-биотитовые и графитизированные кварцево-биотитовые сланцы; *4* — гнейсы, граниты и мигматиты

$$Q = 2\pi r h K_{ср} \frac{dh}{dr}, \; м^3/сутки, \quad (4)$$

где h — мощность подземного потока в произвольном сечении, $м$; r — радиус произвольного (цилиндрического) сечения, $м$; $K_{ср}$ — средний коэффициент фильтрации водоносных пород в выделенном сечении, $м/сутки$.

Обозначим коэффициент фильтрации горной породы на уровне забоя выработки через $K_з$. Тогда уравнение (2) можно представить в виде

$$K' = K_з e^{\alpha h}, \quad (5)$$

где K' — коэффициент фильтрации горной породы на высоте h над забоем выработки.

Средний коэффициент фильтрации по мощности подземного потока

$$K_{ср}h = K_з \int_0^h e^{\alpha h}\, dh. \tag{6}$$

Решение уравнения (6) дает

$$K_{ср} = K_з \frac{e^{\alpha h} - 1}{\alpha h}. \tag{7}$$

Подставив значение $K_{ср}$ в уравнение (4), разделив переменные и проинтегрировав в пределах от r_0 до R, получим

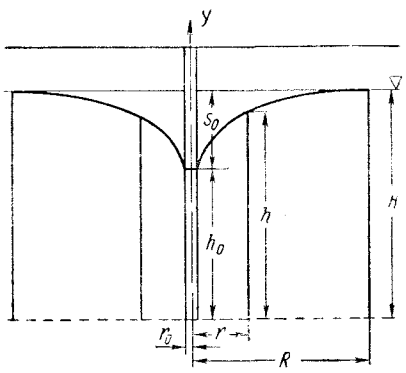


Рис. 2. Схема притока воды к скважине

$$Q = \frac{2\pi K_з}{\alpha^2 \ln \frac{R}{r_0}} (e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0} - \alpha s_0), \tag{8}$$

где r_0 — радиус водозабора, *м*; R — радиус воронки депрессии, *м*; h_0 — мощность подземного потока на стенке скважины при откачке, *м*; s_0 — понижение динамического уровня в скважине, $s_0 = H - h_0$.

Определив $K_з$ и α, можно рассчитать коэффициент фильтрации горной породы на любой высоте от забоя выработки по уравнению (5). Для определения $K_з$ и α достаточно откачку производить при двух понижениях динамического уровня, но для контроля желательно иметь еще одно-два понижения. Допустим, имеются результаты откачки при двух ступенях понижения динамического уровня. Тогда

$$Q' = \frac{2\pi K_з}{\alpha^2 \ln \frac{R_1}{r_0}} \left(e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0'} - \alpha s_0'\right), \tag{9}$$

$$Q'' = \frac{2\pi K_з}{\alpha^2 \ln \frac{R_2}{r_0}} \left(e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0''} - \alpha s_0''\right), \tag{10}$$

где s_0', s_0'' — первое и второе понижения динамического уровня, *м*; h_0' и h_0'' — мощности подземного потока в водозаборе, соответственно, при первой и второй ступенях понижения динамического уровня, *м*; R_1, R_2 — радиусы воронки депрессии, соответственно, при Q' и Q''.

Если вблизи водозабора имеется контур питания (берег реки, сильно обводненное тектоническое нарушение, граница более водопроницаемых пород и т. п.), на котором поддерживается постоянная величина напора, радиус депрессии может быть принят одинаковым для каждой ступени понижения динамического уровня

$$R = 2b, \tag{11}$$

где b — расстояние от центра водозабора до контура питания.

При откачке из неограниченного в плане водоносного горизонта зоны выветривания в случае квазистационарного режима фильтрации радиусы депрессии при первой и второй ступенях понижения

$$R = 1{,}5\sqrt{at}, \tag{12}$$

где a — коэффициент уровнепроводности, *м²/сутки*, t — продолжительность откачки при данном понижении динамического уровня, *сутки*.

Выполняя откачку с одинаковой продолжительностью при обеих ступенях понижения динамического уровня, можно без большой погрешности положить $R = R_1 \approx R_2$. Такое допущение вполне возможно еще и потому, что радиус депрессии входит в уравнения (9) и (10) под знаком логарифма. Разделив почленно уравнение (9) на (10), получим

$$\frac{Q'}{Q''} \approx \frac{e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0'} - \alpha s_0'}{e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0''} - \alpha s_0''}. \tag{13}$$

Уравнение (13) решается методом подбора, для чего определяются три-четыре значения функции

$$f(\alpha) = \frac{e^{\alpha h} - e^{\alpha h_0'} - \alpha s_0'}{e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0''} - \alpha s_0''}. \tag{14}$$

По полученным значениям строится график, по одной оси которого откладываются значения величины α, а по другой — соответствующие им величины $f(\alpha)$ (рис. 3). Значение величины α, при котором $f(\alpha) = \frac{Q'}{Q''}$, является решением уравнения (13). Значение величины α снимается с графика и затем проверяется подстановкой в уравнение (13).

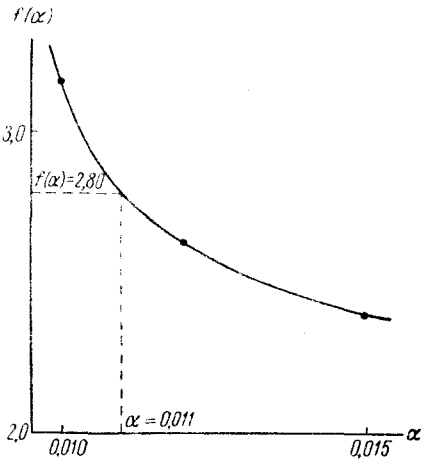


Рис. 3. График для определения величины α

Коэффициент фильтрации на отметке забоя скважины определяется из уравнения (9), решив которое относительно $K_з$, получим

$$K_з = \frac{Q'\alpha^2 \ln \frac{R_1}{r_0}}{2\pi\left(e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0'} - \alpha s_0'\right)}. \tag{15}$$

Если откачка выполнена при нескольких ступенях понижения динамического уровня воды, для расчета величин $K_з$ и α рекомендуется пользоваться минимальным и максимальным понижением динамического уровня. Определив α, для каждой ступени динамического уровня вычисляем

$$f(\alpha) = e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0} - \alpha s_0. \tag{16}$$

По полученным данным строим график (рис. 4). Если он представляет собой прямую линию, то можно использовать формулу (8) для расчета притока воды к вертикальному водозабору. В противном случае следует пользоваться другими зависимостями. Для Криворожского железорудного бассейна по уравнению (8) можно рассчитывать приток воды к столбообразным рудным залежам и шахтным стволам.

Если имеется прямолинейная (в плане) вертикальная дрена, вскрывающая водоносный горизонт зоны выветривания на глубину H от поверхности подземных вод, то, как и в предыдущем случае, полагаем, что практический водоупор проходит через забой дрены

$$Q = K_{ср} B h \frac{dh}{dx}, \tag{17}$$

B — ширина потока, *м*; x — текущая координата.

Подставив в уравнение (17) значение $K_{ср}$ из уравнения (7), получим

$$Q \int_0^L dx = \frac{BK_з}{\alpha} \int_0^H (e^{\alpha h} - 1)\, dh, \tag{18}$$

где L — ширина зоны влияния откачки, *м*.

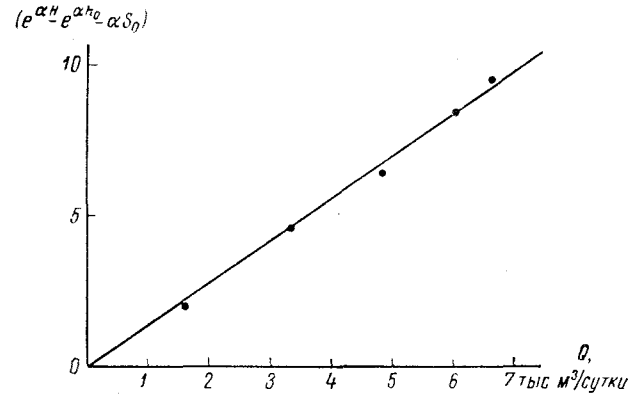


Рис. 4. График $Q = f(e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0} - \alpha s_0)$ по данным опытно-производственного водопонижения на руднике им. С. М. Кирова

Проинтегрировав выражение (18), получим формулу для одностороннего притока воды к совершенной дрене

$$Q = \frac{BK_з}{\alpha^2 L}(e^{\alpha H} - e^{\alpha h_0} - \alpha s_0). \tag{19}$$

В условиях Криворожского железорудного бассейна такими водозаборами обычно являются вскрытые горными выработками или дренажными скважинами блоки карбонатных пород и крутопадающие пластообразные рудные залежи с коэффициентами фильтрации, значительно более высокими по сравнению со вмещающими породами.

Для расчета дебита водозабора по двум ступеням понижения (в условиях зоны выветривания) для радиального и плоского потоков можно использовать зависимость

$$\frac{Q_п}{Q_ф} = \frac{e^{\alpha H} - e^{\alpha h_п} - \alpha s_п}{e^{\alpha H} - e^{\alpha h_ф} - \alpha s_ф}, \tag{20}$$

где $Q_п$ и $Q_ф$ — соответственно, проектный и фактический расходы воды, *м³/сутки*; $s_п$, $s_ф$ — соответственно, проектное и фактическое понижения динамического уровня, *м*; $h_п$, $h_ф$ — проектная и фактическая мощности подземного потока в водозаборе, *м*. Величина α определяется по двум ступеням понижения динамического уровня по уравнению (13).

Приведем примеры расчетов коэффициентов фильтрации горных пород и дебитов водозаборов.

Пример 1. Поскольку фильтрационные свойства аркозово-филлитовой толщи Криворожской метаморфической серии изучены недостаточно, для определения ее коэффициентов фильтрации и величины α воспользуемся данными водоотлива при проходке ствола шахты Фланговая рудника им. С. Орджоникидзе: радиус ствола 3,5 *м*, глубина 330 *м*. Подземные воды встречены на глубине 40 *м*. При понижении уровня $s_0'' = 36$ *м* расход воды $Q'' = 2{,}5$ *м*^{3}/*ч*, а при понижении уровня $s_0' = 290$ *м* $Q' = 7{,}0$ *м*^{3}/*ч*.

Определим величину α и коэффициенты фильтрации на глубинах 330 и 40 *м*.

Величину α найдем по уравнению (13)

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{e^{290\alpha} - e^{0\alpha} - 290\alpha}{e^{290\alpha} - e^{254\alpha} - 36\alpha} = 2{,}80.$$

Затем вычислим значения

$$f(\alpha) = \frac{e^{290\alpha} - e^{0\alpha} - 290\alpha}{e^{290\alpha} - e^{254\alpha} - 36\alpha}$$

при значениях α:

α	0,015	0,012	0,010
$f(\alpha)$	2,40	2,64	3,16

По этим данным строим график (см. рис. 3) изменения $f(\alpha)$. На нем значению $f(\alpha) = 2{,}80$ соответствует значение $\alpha = 0{,}011$, являющееся в нашем случае решением уравнения (13).

Коэффициент фильтрации аркозово-филлитовой толщи на глубине 330 *м* определим по формуле (15)

$$K_з = \frac{0{,}011^2 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 2{,}3 \lg \frac{70}{3{,}5}}{2 \cdot 3{,}14 e^{0{,}011 \cdot 290} - e^{0{,}011 \cdot 254} - 0{,}011 \cdot 36} = 4{,}77 \cdot 10^{-4},\ м/сутки.$$

Коэффициент фильтрации на глубине 40 *м* найдем из выражения (5)

$$K' = 4{,}77 e^{0{,}011 \cdot 290} = 9{,}75 \cdot 10^{-3},\ м/сутки.$$

Пример 2. На руднике им. С. М. Кирова из блока карбонатных пород откачивается вода для понижения динамического уровня трещинно-карстовых вод. Приток воды к блоку образуется за счет фильтрации через зону выветривания кварцево-биотитовых и графитито-кварцево-биотитовых сланцев. Контуром питания служит региональный Тарапаковский надвиг, вытянутый почти параллельно рассматриваемому блоку карбонатных пород. В процессе водопонижения было сделано пять ступеней понижения динамического уровня при следующих расходах откачиваемой воды:

Q, *м*^{3}/*сутки*	1524	3349	4860	6084	6687
$s_ф$ *м*	25	60	90	130	155

По данным первой и пятой ступеней понижения уровня по формуле (13) определяем величину α и значения $f(\alpha) = e^{\alpha H} - e^{\alpha h_ф} - \alpha s_ф$ для каждого понижения. Как видно на рис. 4, все точки графика легли практически на одну прямую, что свидетельствует о возможности расчета притока воды к выделенному карбонатному блоку пород по уравнению (13). Далее, по формуле (20) находим установившийся дебит дренажной установки при понижении динамического уровня $s_п = 215$ *м*, т. е. для следующей сту-

пени понижения динамического уровня. Положив $H = 500$ *м* и подставив в уравнение (20) значение $\alpha = 0{,}00575$, рассчитанное по первой и пятой ступеням понижения динамического уровня, получим

$$Q_{\text{п}} = 6687\,\frac{e^{0,00575\cdot 500} - e^{0,00575\cdot 285} - 0{,}00575\cdot 215}{e^{0,00575\cdot 500} - e^{0,00575\cdot 345} - 0{,}00575\cdot 155} = 7924 \ м^3/сутки.$$

Таким образом, характер изменения водопроницаемости горных пород с глубиной в пределах зоны выветривания наиболее точно аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$K = K_0 e^{-\alpha z}.$$

Дебиты водозаборов при экспотенциальном законе изменения водопроницаемости горных пород по глубине можно рассчитать по предлагаемым приближенным зависимостям (8), (19), (20). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными опытно-производственного водопонижения, шахтного водоотлива и опытно-фильтрационных работ в Криворожском железорудном бассейне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боревский Л. В. Определение расчетных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов зоны выветривания. Разведка и охрана недр, № 3, 1966.

2. Чернышев С. Н. О водопроницаемости трещиноватых горных пород в зоне разгрузки и выветривания. Бюлл. Моск. об-ва испыт. природы, отд. геол., вып. 40, № 4, 1965.

3. Ярцев Н. А. О трещиноватости и закарстованности карбонатной толщи Саксаганского района. Тр. Ленгидропроекта, сб. 4. 1966.