Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIV, вып. 2, 1958 г.

ОРИЕНТИРОВОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД ПО ПОГЛОЩЕНИЮ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Е. Е. Керкис

Поглощение промывочной жидкости является четким признаком водопроницаемости горных пород, проходимых буровыми скважинами. Особенно важно учитывать поглощение промывочной жидкости трещиноватыми и закарстованными породами, где поглощение даже глинистых растворов нередко бывает значительным и может быть использовано для предварительного суждения о водопроницаемости этих пород (до производства опытных гидрогеологических работ).

При бурении обычно ограничиваются качественной характеристикой поглощения промывочной жидкости и указывают на частичное или полное поглощение. При частичном поглощении отмечают его интенсивность. Измерение расхода промывочной жидкости, поглощаемой во время бурения, производится реже. Иногда проводятся также наблюдения над понижением уровня промывочной жидкости в скважине при извлеченном из нее буровом инструменте. Данные подобных наблюдений заносятся в буровые журналы, а затем фигурируют нередко в отчетах по разведочным работам на полезные ископаемые, по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям.

Подобные необработанные фактические данные не представляют даже ориентировочной количественной оценки степени водопроницаемости пород, поскольку они не учитывают влияния на поглощение, давления столба жидкости в скважине и ее вязкости. Так, например, довольно сильно проницаемые породы, уровень воды в которых близок к поверхности, могут обнаружить лишь небольшое поглощение промывочной жидкости, а менее проницаемые породы при глубоком залегании статического уровня подземных вод — значительное или даже полное поглощение. Глинистые растворы с высокой вязкостью при одинаковых гидрогеологических условиях, очевидно, поглощаются слабее, чем менее вязкие.

В предлагаемой статье рассматриваются основные явления, имеющие место при поглощении промывочной жидкости в буровых скважинах, и приводятся схемы расчетов, позволяющих приблизительно определить величину коэффициента водопроницаемости по данным простейших наблюдений, производимых в процессе бурения. Для гидрогеологической характеристики трещиноватых и закарстованных пород даже грубо ориентировочная оценка водопроницаемости, полученная подоб-

ным путем, имеет существенное значение, особенно при большом числе данных, характеризующих породы на различной глубине и в различных пунктах изучаемой площади. При разведке месторождений полезных ископаемых, например, наблюдения над поглощением промывочной жидкости в сильноводоносных трещиноватых и закарстованных породах во всех разведочных скважинах (или в большей их части) при соответствующей обработке полученных данных дают ценный гидрогеологический материал, существенно дополняющий результаты опытных гидрогеологических работ. Кроме того, данные о поглощении промывочной жидкости дают возможность более обоснованно наметить типичные участки для заложения гидрогеологических скважин. Необходимость получения большого числа хотя бы приблизительных определений степени водопроницаемости для трещиноватых и закарстованных пород обусловлена непостоянством водопроницаемости по глубине и площади. Поэтому немногочисленные гидрогеологические скважины, особенно заданные без учета гидрогеологических данных, которые могут быть получены при бурении разведочных скважин, дают обычно случайные величины коэффициента водопроницаемости. При этом легко могут оказаться неопробованными наиболее трещиноватые зоны или отдельные крупные водопроводящие трещины и каналы, имеющие первостепенное значение для водопроницаемости толщ, горизонтов или массивов трещиноватых и закарстованных пород.

Систематические наблюдения над поглощением промывочной жидкости и расчеты приблизительных значений коэффициента водопроницаемости дают значительно более полное представление о водопроницаемости пород, а также позволяют судить о следующих особенностях сильнотрещиноватых и закарстованных пород: 1) степени постоянства водопроницаемости и изменении ее в различных направлениях; 2) закономерностях, характеризующих влияние на водопроницаемость различных факторов, в первую очередь рельефа (древнего и современного) геологического строения и тектоники; 3) распространении участков наиболее высокой водопроницаемости, связанных с тектоническими нарушениями, зонами интенсивной трещиноватости и закарстованности и т. п.

Эти представления позволяют правильно разместить на исследуемой площади гидрогеологические скважины и обеспечить гидрогеологическое опробование сильноводопроницаемых зон, имеющих наиболее существенное значение для притока воды в скважины, колодцы и горные выработки, фильтрации под гидротехническими сооружениями и т. д. Объем опытных гидрогеологических работ может быть увеличен при значительном непостоянстве водопроницаемости, установленной по поглощению промывочной жидкости, и несколько уменьшен при сравнительном ее постоянстве. В начальной стадии гидрогеологических исследований при простых гидрогеологических условиях приблизительный коэффициент водопроницаемости иногда может быть определен без опытных работ.

Установление корреляционной связи между величинами коэффициентов водопроницаемости, полученными в результате опытных работ и найденными по поглощению промывочной жидкости, должно облегчить определение средних значений этого показателя, обеспечивающих надежность гидрогеологических расчетов.

Таким образом, наиболее точное и правильное представление о водопроницаемости пород будет результатом комплекса небольшого числа надежных значений коэффициента водопроницаемости, установленных опытными работами для наиболее характерных участков изу-

чаемого горизонта или массива и значительного числа ориентировочных значений степени водопроницаемости, полученных наиболее простым способом. Таким способом для трещиноватых и, вероятно, большинства закарстованных пород являются наблюдения над поглощением промывочной жидкости, проведенные и обработанные в соответствии с указаниями настоящей работы.

Рассмотрим предварительно условия движения в трещиноватых породах структурных жидкостей, какими являются глинистые растворы.

Течение структурной жидкости через плоскую щель (трещину) характеризуется зависимостью

$$q = \frac{pb^3}{12\mu L}\left(1 - \frac{3}{2}\frac{p_0}{p} + \frac{1}{2}\frac{p_0^3}{p^3}\right), \qquad (1)$$

где q — расход жидкости на единицу ширины щели;
p — падение давления на отрезке щели длиной L;
b — просвет (толщина) щели;
μ — вязкость жидкости;
p_0 — давление, преодолевающее сопротивление сдвигу структурной жидкости.

При движении структурной жидкости

$$p_0 = \frac{2\tau_0 L}{b},$$

где τ_0 — динамическое сопротивление сдвигу.

Вывод формулы (1) приведен в книге Р. И. Шищенко [4], нами изменены лишь некоторые обозначения.

Подставляя в формулу (1) указанное выше значение p_0 и учитывая, что $p = \gamma h$ (где γ — вес единицы объема жидкости и h — напор), а также пренебрегая относительно малой величиной $\frac{p_0^3}{p^3}$, получим

$$q = \frac{\gamma h b^3}{12\mu L}\left(1 - 3\frac{\tau_0 L}{\gamma b h}\right) = \frac{\gamma b^3}{12\mu}\left(J - \frac{3\tau_0}{\gamma b}\right), \qquad (2)$$

где J — пьезометрический уклон (градиент).

Выражение (2) отличается от аналогичной зависимости для жидкости, не обладающей структурой, членом $\frac{3\tau_0}{\gamma b}$, который можно рассматривать как минимальное необходимое для движения жидкости значение пьезометрического уклона и назвать начальным градиентом, обозначив через J_0. Соответственно формула (2) приобретает вид

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu}(J - J_0). \qquad (3)$$

При $J < J_0$ жидкость, очевидно, не будет двигаться.

Переходя от щели к трещиноватой породе, пересеченной большим числом трещин [6], получаем следующее выражение для расхода Q через площадь поперечного сечения трещиноватой породы F:

$$Q = \frac{\gamma b_э^3}{6\mu l}F(J - J_0') = K\frac{\gamma}{\mu}F(J - J_0') = k_ф' F(J - J_0'), \qquad (4)$$

где $b_э$ — некоторая эффективная толщина трещин, приближающаяся к толщине более крупных из них;
l — среднее расстояние между трещинами;

J_0' — эффективное значение начального градиента, отвечающее более крупным трещинам, определяющим в основном расход жидкости;

$K = \frac{b_э^3}{6l}$ — коэффициент проницаемости, не зависящий от свойств жидкости;

$k'_ф = k\frac{\gamma}{\mu}$ — коэффициент фильтрации для данной жидкости (например, для глинистого раствора с вязкостью μ и весом единицы объема γ);

$k_ф$ — коэффициент водопроницаемости.

Приведенная ниже формула для движения структурной жидкости по цилиндрической трубе (см. формулу (19) позволяет получить выражение, аналогичное формуле (4). Таким образом, в закарстованных породах при достаточно малых скоростях, при которых еще не возникает турбулентного движения, течение структурной жидкости подчиняется также закономерности, выражаемой формулой (4).

Применяя схему, аналогичную выводу формулы Дюпюи, рассмотрим поглощение структурной жидкости в буровой скважине, вскрывшей водоносный горизонт.

Для напорного радиального потока, распространяющегося от поверхности скважины на основании формулы (4) действительно уравнение

$$Q = 2\pi K\frac{\gamma}{\mu}Mr\,(J - J_0') = 2\pi K\frac{\gamma}{\mu}Mr\left(-\frac{dh}{dr} - J_0'\right),$$

где M — мощность водоносного горизонта;

r — расстояние от оси скважины;

h — пьезометрический уровень для сечения, отстоящего на расстоянии r от оси скважины.

Разделяя переменные и интегрируя приведенное уравнение в пределах для r от r_0 до $R_г$ (r_0 — радиус скважины, $R_г$ — радиус зоны распространения жидкости) и для h от h_0 до $h_г$ (h_0 — динамический уровень жидкости в скважине и $h_г$ — пьезометрический уровень на расстоянии $R_г$ от оси скважины), получим:

$$\left.\begin{aligned} Q\frac{dr}{r} &= 2\pi K\frac{\gamma}{\mu}M\,(-dh - J_0'dr)\\ Q\ln\frac{R_г}{r_0} &= 2\pi K\frac{\gamma}{\mu}[h_0 - h_г - J_0'(R_г - r)]\\ Q &= 2\pi K\frac{\gamma}{\mu}M\frac{h_0 - h_г - J_0'(R_г - r_0)}{\ln R_г' - \ln r_0} \end{aligned}\right\}. \qquad (5)$$

Подобным же образом получаем для безнапорных вод

$$Q = \pi K\frac{\gamma}{\mu}\frac{h_0^2 - h_г^2 - h_{ср}J_0'(R_г - r_0)}{\ln R_г - \ln r_0}, \qquad (6)$$

где $h_г$ — глубина слоя жидкости на расстоянии $R_г$ от оси скважины;

$h_{ср}$ — некоторое среднее между h_0 и $h_г$ значение уровня воды.

Формулы (5) и (6) отличаются от обычных формул Дюпюи для поглощающих скважин наличием в числителе величин $J_0'(R_г - r_0)$ или $h_{ср}J_0'(R_г - r_0)$. При этом, согласно формуле (5), для напорных вод поглощение жидкости происходит при $h_0 - h_г > J_0'(R_г - r_0)$ и не про-

исходит при $h_0 - h_г > h_{ср} J_0' (R_г - r_0)$. Подобным же образом для безнапорных вод поглощение жидкости, согласно формуле (6), происходит при $h_0^2 - h_г^2 > h_{ср} J_0' (R_г - r_0)$ и прекращается при $h_0^2 - h_г^2 = h_{ср} J_0' (R_г - r_0)$. Обозначим уровень, при котором прекращается поглощение структурной жидкости вследствие уменьшения градиента до J_0' при постепенном снижении динамического уровня в скважине, через $h_{о,\ н}$. При этом для напорных вод

$$h_{о,\ н} = h_г + J_0' (R_г - r_0),$$

откуда при

$$h_0 > h_{о,\ н}$$

$$Q = \frac{2\pi K \frac{\gamma}{\mu} M (h_0 - h_{о,\ н})}{\ln R_г - \ln r_0}. \qquad (7)$$

Для безнапорных вод

$$h_{о,\ н}^2 = h_г^2 + h_{ср} J_0' (R_г - r_0)$$

и, следовательно, при

$$h_0 > h_{о,\ н}$$

$$Q = \frac{\pi K \frac{\gamma}{\mu} (h_0^2 - h_{о,\ н}^2)}{\ln R_г - \ln r_0}. \qquad (8)$$

Таким образом, выражения (5) и (6) преобразуются в обычные формулы типа Дюпюи для поглощающих скважин.

Следовательно, радиальное движение структурных жидкостей, в частности поглощение глинистых растворов, подчиняется также формулам типа Дюпюи. Для случая поглощения статический уровень должен быть заменен величиной $h_{о,\ н}$, т. е. уровнем, при котором поглощение раствора практически прекращается. Уровень $h_{о,\ н}$ будем называть «наблюдаемым установившимся уровнем». Этот уровень вследствие свойственного глинистым растворам сопротивления сдвигу расположен при понижении уровня раствора в скважине выше статического. Определить величину $h_{о,\ н}$ можно систематическими наблюдениями над понижением уровня глинистого раствора в скважине, из которой извлечен буровой инструмент, до прекращения понижения уровня.

Для определения коэффициента проницаемости на основании поглощения промывочной жидкости, согласно зависимости (7) или (8), необходимы следующие данные: 1) расход промывочной жидкости при поглощении и ее динамический уровень; 2) наблюдаемый установившийся уровень, при котором практически прекращается поглощение жидкости; 3) вязкость и вес единицы объема жидкости; 4) мощность водоносного пласта; 5) радиус скважины и радиус зоны распространения глинистого раствора.

Данные о поглощении промывочной жидкости в процессе бурения использовать для расчета трудно, так как давление жидкости у забоя и, следовательно, динамический уровень в подобных условиях зависят от потерь напора при движении жидкости по кольцевому пространству между стенками скважины и буровым снарядом. Эти потери напора очень трудно надежно определить. Кроме того, примесь частиц измельченной породы, обычно неравномерная, влияет также на свойства раствора. Поэтому рекомендуется определять расход промывочной жидкости на поглощение в периоды извлечения бурового снаряда из скважины. Для этого можно либо отрегулировать подачу раствора в сква-

жину так, чтобы динамический уровень жидкости оставался неизменным, либо вести наблюдения над понижением уровня жидкости в скважине при отсутствии ее подачи. Последний прием наиболее прост и допустим для ориентировочного определения водопроницаемости, несмотря на неустановившийся характер движения.

При постоянном динамическом уровне в скважине, т. е. при почти установившемся движении,[1] расчет коэффициента проницаемости или коэффициента фильтрации раствора ($\kappa_\Phi' = K\frac{\gamma}{\mu}$) производится по формулам (7) или (8), в которые, как указано выше, для глинистых растворов вместо статического уровня введена величина «наблюдаемого установившегося уровня».

Для неустановившегося движения, имеющего место при наблюдениях над понижением уровня жидкости в скважине, можно применить приведенные ниже формулы.

Пусть в течение промежутка времени t уровень промывочной жидкости понижается от h_2 до h_1. Переменный расход воды

$$Q = \pi r_0^2 \frac{dh}{dt}.$$

Считая, что формула Дюпюи может быть применена для короткого периода времени при неустановившемся движении подземных вод, имеем для напорных вод

$$-\pi r_0^2 \frac{dh_0}{dt} = 2\pi KM \frac{\gamma}{\mu} \frac{h_0 - h_{0,\,н}}{\ln \frac{R_г}{r_0}}$$

и соответственно для безнапорных вод

$$-\pi r_0^2 \frac{dh_0}{dt} = \pi K \frac{\gamma}{\mu} \frac{h_0^2 - h_{0,\,н}^2}{\ln \frac{R_г}{r_0}}.$$

Преобразуя эти выражения, получим:

$$\frac{dh_0}{h_0 - h_{0,\,н}} = -\frac{2K\gamma M}{\mu r_0^2 \ln \frac{R_г}{r_0}} dt.$$

$$\frac{dh_0}{h^2 - h_{0,\,н}^2} = -\frac{K\gamma}{\mu r_0^2 \ln \frac{R_г}{r_0}} dt.$$

Интегрируя полученные дифференциальные уравнения при пределах для $h_0 - h_2$ и h_1, имеем:

$$\ln \frac{h_2 - h_{0,\,н}}{h_1 - h_{0,\,н}} = \frac{2K\gamma M}{\mu r_0^2 \ln \frac{R}{r_0}} t; \qquad (9)$$

$$\frac{1}{2h_{0.\,н}} \ln \frac{(h_2 - h_{0,\,н})(h_1 + h_{0,\,н})}{(h_1 - h_{0,\,н})(h_2 + h_{0,\,н})} = \frac{K\gamma}{\mu r_0^2 \ln \frac{R_г}{r_0}} t. \qquad (10)$$

[1] Не вполне установившийся режим в данном случае зависит от увеличения значения $R_г$.

Решая уравнения (9) и (10) относительно K, получим:
для напорных вод

$$K = \frac{\mu r_0^2 \ln \frac{R_г}{r_0}}{2\gamma M t} \ln \frac{h_2 - h_{о,\,н}}{h_1 - h_{о,\,н}}; \qquad (11)$$

для безнапорных вод

$$K = \frac{\mu r_0^2 \ln \frac{R_г}{r_0}}{2\gamma h_{о,\,н}} \ln \frac{(h_2 - h_{о,\,н})(h_1 + h_{о,\,н})}{(h_1 - h_{о,\,н})(h_2 + h_{о,\,н})}. \qquad (12)$$

Формулы (11) и (12) позволяют рассчитать значения коэффициента проницаемости K, если известны вязкость и вес единицы объема промывочной жидкости.

Коэффициент водопроницаемости рассчитывается по формуле

$$k_ф = K \frac{\gamma_в}{\mu_в} = K \frac{g}{\nu_в}, \qquad (13)$$

где $\gamma_в$ — вес единицы объема воды;
$\mu_в$ — коэффициент вязкости воды;
$\nu_в$ — кинематический коэффициент вязкости воды;
g — ускорение силы тяжести.

Можно также определить по формулам (11) или (12) коэффициент фильтрации промывочной жидкости, т. е. величину

$$k_ф' = K \frac{\gamma}{\mu},$$

а коэффициент водопроницаемости по формуле

$$k_ф = k_ф' \frac{\mu}{\mu_в} \frac{\gamma_в}{\gamma} = k_ф' \frac{\nu}{\nu_в}, \qquad (14)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости раствора.

Величина радиуса зоны распространения промывочной жидкости $R_г$ может быть ориентировочно рассчитана:
для напорных вод

$$R_г = 0{,}56 \sqrt{\frac{Q_р t_п}{\varphi M}} = 0{,}56 \sqrt{\frac{V_р}{\varphi M}}; \qquad (15)$$

для безнапорных вод (приближенно)

$$R_г \approx 0{,}56 \sqrt{\frac{Q_р t_п}{\varphi (H + 0{,}12 h_0)}}, \qquad (16)$$

где $Q_р$ — средний расход на поглощение промывочной жидкости во время бурения, *м/сутки*;
$t_п$ — время поглощения промывочной жидкости, т. е. время, прошедшее от начала проходки водоносного горизонта, для которого определяется коэффициент водопроницаемости, сутки;
$V_р = Q_р t_п$ — объем промывочной жидкости, поглощенной за время, прошедшее от начала проходки водоносного горизонта;
φ — объемный коэффициент трещиноватости пород;
H — мощность безнапорного водоносного горизонта.

Для получения формулы (15) объем поглощенной промывочной жидкости $V_р = Q_р t_п$ приравнен объему цилиндрической зоны пород радиуса $R_г$, умноженному на величину φ, т. е.

$$V_р = Qt_п = \pi R_г^2 M\varphi,$$

откуда получаем значение $R_г$, указанное выше. Формула (16) получена подобным же путем, но с учетом дополнительного объема опрокинутой депресионной воронки [7].

Входящая в формулы для определения коэффициента водопроницаемости величина вязкости или кинематической вязкости промывочной жидкости для глинистых растворов должна быть определена посредством одного из существующих приборов.

Для определения вязкости глинистых растворов в нашей практике чаще используется стандартный полевой вискозиметр СВП-5 (рис. 1), причем вязкость измеряется временем (секунды) вытекания 500 *см*^{3} раствора от уровня, отвечающего 700 *см*^{3}.

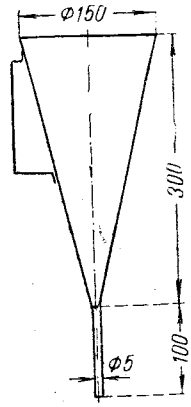


Рис. 1. Стандартный полевой вискозиметр СПВ-5

Для определения коэффициента фильтрации по поглощению глинистого раствора необходимо перейти от условного выражения вязкости в секундах, определяемой стандартным полевым вискозиметром, к вязкости в пуазах или кинематической вязкости в *см*^{2}/*сек*.

Чтобы установить режим движения жидкости через вискозиметр, определим число Рейнольдса для цилиндрической части вискозиметра:

$$\mathrm{Re} = \frac{\gamma R}{\nu} = \frac{vd}{4\nu}, \qquad (17)$$

где R — гидравлический радиус;
ν — кинематический коэффициент вязкости;
v — скорость течения жидкости;
d — диаметр трубки.

Если время вытекания 500 *см*^{3} жидкости равно T, то средняя скорость движения жидкости в цилиндрической трубке

$$v_{ср} = \frac{500}{T\frac{\pi d^2}{4}}.$$

Подставляя это значение $v_{ср}$ в формулу (17) и учитывая, что $d = 0{,}5$ *см*, получим

$$\mathrm{Re} = \frac{318}{T\nu}. \qquad (18)$$

Для воды при 10° $\nu = 0{,}013$ *см*^{2}/*сек*., а $T = 15{,}5$ сек. Подставляя эти значения ν и T в формулу (18), получим $\mathrm{Re} = 1570$, т. е. величину, превышающую нижнее критическое значение числа Re, которое для гладких труб равно 500 [1]. Таким образом, движение чистой воды через вискозиметр может быть неустойчивым и переходить в турбулентное.

Ниже показано, что глинистые растворы, исключая очень жидкие, при протекании через цилиндрическую трубку вискозиметра СПВ-5 бу-

дут характеризоваться ламинарным движением. При этом для конической части вискозиметра число Re будет еще меньшим, чем для цилиндрической, поэтому ламинарное движение здесь должно наблюдаться и при меньшей вязкости.

Установим зависимость времени T протекания 500 $см^3$ глинистого раствора через вискозиметр СПВ-5 от кинематической вязкости в условиях ламинарного движения. При этом будем учитывать влияние динамического сопротивления сдвигу τ_0 (не зависящее от скорости движения жидкости), обусловленное структурой глинистого раствора.

Потеря напора на трение h при ламинарном движении структурной жидкости по трубке диаметра d выражается следующей формулой [4, 5]:

$$h = \frac{32\mu l v}{\gamma d^2} + \frac{16\tau_0 l}{3\gamma d} = \frac{32\nu l v}{g d^2} + \frac{16\tau_0 l}{3\gamma d}, \qquad (19)$$

где μ — абсолютная вязкость;
l — длина трубки;
v — скорость движения жидкости;
γ — вес единицы объема жидкости;
τ_2 — динамическое сопротивление сдвигу;
ν — кинематическая вязкость;
g — ускорение силы тяжести.

Выражая в формуле (19) скорость через расход жидкости, т. е. подставляя значение

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2},$$

получим

$$h = \frac{128\nu l Q}{\pi g d^4} + \frac{16\tau_0 l}{3\gamma d} = \left(\frac{AQ}{d^4} + \frac{B}{d}\right) l, \qquad (20)$$

где

$$A = \frac{128\nu}{\pi g};$$

$$B = \frac{16}{3}\frac{\tau_0}{\gamma}.$$

При единицах измерения Г (сила), *см* и сек.

$$A = 0{,}0417\nu;\ B = 5{,}33\frac{\tau_0}{\gamma}.$$

Для цилиндрической части вискозиметра СПВ-5 диаметром 0,5 *см* и длиной 10 *см* потеря напора на трение, согласно формуле (20),

$$h_ц = \left(A\frac{Q}{0{,}5^5} + \frac{B}{0{,}5}\right)10 = 160AQ + 20B. \qquad (21)$$

Потерю напора на трение в конической части вискозиметра определим следующим образом.

Потеря напора для элемента высотой dz (рис. 2), согласно (формуле (20),

$$dh = -\left(\frac{AQ}{d^4} + \frac{B}{d}\right)dz, \qquad (22)$$

где знак минус отвечает оси z, направленной вверх.

При начале координат, расположенном в точке пересечения образующих конуса (рис. 2), зависимость между величинами d и z имеет вид

$$d = \frac{d_1}{z_0} z,$$

где d_1 — диаметр нижнего (малого) основания усеченного конуса;
z_0 — расстояние начала координат от низа усеченного конуса.

Для вискозиметра СПВ-5 $d_1 = 0{,}5$ *см* и $z_0 = 1{,}034 \approx 1{,}03$ *см*. Таким образом,

$$d = 0{,}483z. \tag{23}$$

Подставляя это значение d в уравнение (22), имеем

$$dh = -\left(\frac{18{,}4AQ}{z^4} + \frac{2{,}1B}{z}\right) dz.$$

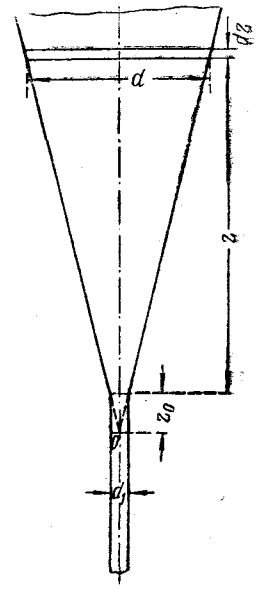


Рис. 2. Схема для расчета потерь напора на трение в конической части вискозиметра СПВ-5

Интегрируя это уравнение при пределах от z до z_0 (z — переменная величина), получим следующее выражение для потери напора на трение $h_к$ в конической части вискозиметра:

$$h_к = \frac{1}{3} 18{,}4AQ \left(\frac{1}{z_0^3} - \frac{1}{z^3}\right) + 2{,}1B \ln \frac{z}{z_0},$$

или, учитывая, что $z_0 = 1{,}03$ *см*,

$$h_1 = 6{,}15AQ\left(0{,}9 - \frac{1}{z^3}\right) + 2{,}1B \ln \frac{z}{1{,}03}. \tag{24}$$

Наименьшее значение $z = 14{,}7$ *см* отвечает объему жидкости в вискозиметре 200 *см*^{3}, а соответствующая высота столба жидкости в конической части прибора 13,7 *см*.

Наибольшее значение $z = 22{,}5$ *см* отвечает объему жидкости 700 *см* (при высоте столба жидкости в конической части прибора примерно 21,5 *см*).

Величина $\frac{1}{z^3}$, входящая в формулу (24), очень мала по сравнению со значением $\frac{1}{z_0^3}$, равным 0,9 (при $z_{max} = 22{,}5$ *см* $\frac{1}{z^3} = 0{,}000115$, а при $z_{min} = 14{,}7$ *см* $\frac{1}{z} = 0{,}00031$). Поэтому, пренебрегая величиной $\frac{1}{z^3}$ и считая $\ln z_0 = 0$, формулу (24) можно переписать в виде

$$h_к = 5{,}5AQ + 2{,}1B \ln z. \tag{25}$$

Общая потеря напора на трение в вискозиметре h_S, согласно формулам (21) и (25),

$$h_S = 165{,}5AQ + (20 + 2{,}1 \ln z) B. \tag{26}$$

Напор H, вызывающий движение жидкости в вискозиметре, равен общей высоте столба жидкости в конической и цилиндрической его части. Таким образом, при $z_0 = 1$ *см*

$$H = z - z_0 + 10 = z + 9 \ (см). \tag{27}$$

Этот напор расходуется на трение и создание скоростного напора, т. е.

$$H = h_S + \alpha \frac{v^2}{2g},$$

где α — коэффициент, учитывающий распределение скоростей в поперечном сечении.

При ламинарном движении для круглого сечения $\alpha = 2$. Подставляя в формулу (27) указанное выше значение H и значение h_S, согласно выражению (26), а также учитывая, что при $d_1 = 0{,}5$ *см*

$$v = \frac{Q}{0{,}96},$$

получим

$$z + 9 = 165{,}5AQ + (20 + 2{,}1 \ln z) B + \frac{Q^2}{(0{,}196)^2 g}.$$

После преобразования это выражение переходит в квадратное уравнение

$$0{,}0265Q^2 + 165{,}5AQ + (20 + 2{,}1 \ln z) B - (z + 9) = 0,$$

решая которое, получим

$$Q = \frac{-165{,}5A + \sqrt{27\,400A^2 + 0{,}106\,[(20 + 2{,}1 \ln z) B - (z + 9)]}}{0{,}053}. \tag{28}$$

Расход жидкости при вытекании из вискозиметра

$$Q = -\frac{\pi d^2}{4} \frac{dz}{dt},$$

где знак минус учитывает направление оси z снизу вверх.

Подставляя в эту формулу значение z, согласно выражению (23), имеем

$$Q = -0{,}183z^2 \frac{dz}{dt}.$$

Подстановка полученного значения Q в формулу (28) после преобразования дает дифференциальное уравнение

$$-0{,}183z^2 \frac{dz}{dt} =$$

$$= \frac{-165{,}5A + \sqrt{27\,400A^2 - 0{,}106\,[(20 + 2{,}1 \ln z) B - (z + 9)]}}{0{,}053}. \tag{29}$$

Точное интегрирование этого уравнения невозможно. Поэтому, учитывая приближенный характер наших расчетов, заменяем в правой части уравнения величины $\ln z$ и z их средними значениями:

$$(\ln z)_{ср} = \frac{\ln 22{,}5 + \ln 14{,}7}{2} = 2{,}89;$$

$$z_{ср} = \frac{22{,}5 + 14{,}7}{2} = 18{,}6 \ см.$$

Подставляя, кроме того, в формулу (29) указанные выше значения A и B, после преобразований получим более простое уравнение

$$\frac{0{,}0097z^2dz}{6{,}9\nu^2 - \sqrt{(6{,}9\nu)^2 - 14{,}7\frac{\tau_0}{\gamma} + 2{,}93}} = dt. \qquad (30)$$

Интегрируя уравнение (30) в пределах для z от 22,5 до 14,7 *см* и для t от 0 до T, получим зависимость времени вытекания 500 *см*^{3} глинистого раствора из вискозиметра СПВ-5 от его кинематической вязкости и значения $\frac{\tau_0}{\gamma}$

$$T = \frac{26{,}6}{-6{,}9\nu + \sqrt{(6{,}9\nu)^2 - 14{,}7\frac{\tau_0}{\gamma} + 2{,}93}}. \qquad (31)$$

В таблице приведены значения T, вычисленные по формуле (31) для растворов с различной кинематической вязкостью и значениями $\frac{\tau_0}{\gamma}$ от 0 до 0,06 *см*.

Таблица

ν, $\frac{см^2}{сек}$	$\frac{\tau_0}{\gamma}$, *см*				ν, $\frac{см^2}{сек}$	$\frac{\tau_0}{\gamma}$, *см*			
	0	0,02	0,04	0,06		0	0,02	0,04	0,06
0,03	17,6	18,7	20,0	21,6	0,2	32,5	35,5	39,1	44,4
0,05	19,1	20,3	21,9	23,8	0,3	43,5	47,5	53,2	60,5
0,1	23,2	24,8	26,9	30,0	0,4	55,5	60,5	—	
0,15	27,6	30,0	32,6	36,7					

На график рис. 3 нанесены кривые зависимости величины ν от T для указанных в таблице значений $\frac{\tau_0}{\gamma}$. Для контроля график дополнен несколькими опытными точками, полученными путем параллельного определения τ_0 и μ на ротационном вискозиметре типа Мак-Майкеля и времени вытекания раствора из вискозиметра СПВ-5. На графике показана также линия, отвечающая величине Re=500, рассчитанной по формуле (18). При ν и T, отвечающих Re$>$500 (ниже линии Re$=$ $=$ 500 на графике), режим движения может быть неустойчивым, т. е. возможно развитие турбулентного движения. По-видимому, турбулентное движение глинистых растворов может возникать также только при очень малой величине τ_0. Как указано выше, турбулентное движение возможно при вытекании из вискозиметра чистой воды; этим можно объяснить отклонение точки, отвечающей воде, от теоретической кривой зависимости между ν и T при значении $\frac{\tau_0}{\gamma} = 0$. Однако отклонение этой точки сравнительно невелико.

При расчете по графику рис. 3 величину τ_0 для глинистых растворов можно принимать в пределах 0,02—0,06 *г/см*^{2} (если отсутствуют определения этой величины) в зависимости от густоты глинистого раствора. Это допустимо, так как наши расчеты ориентировочны, а величина τ_0 при колебании в указанных пределах сравнительно мало влияет на зависимость между ν и T.

Пример ориентировочного определения коэффициента водопроницаемости по поглощению глинистого раствора. *Исходные данные.*

В период отсутствия буровых работ поглощение глинистого раствора выражалось понижением уровня в скважине в течение 1 мин. на 2,5 *м* (с глубины 5 до 7,5 *м* от устья). При уровне раствора 25 *м* от устья поглощение прекратилось. Водоносный горизонт — напорный в трещиноватых известняках мощностью 20 *м*. Вязкость глинистого раствора по вискозиметру СПВ-5 — 22 сек. Диаметр скважины 200 *мм*.

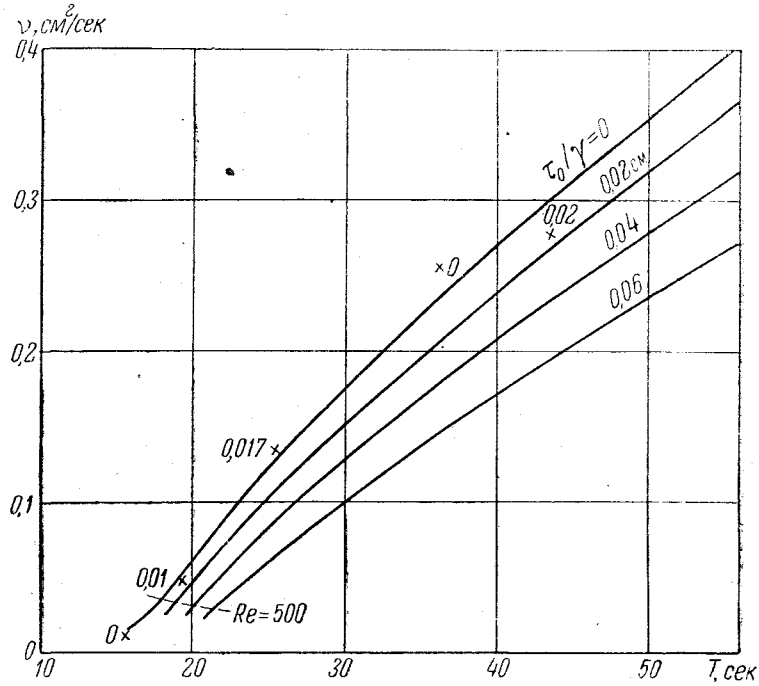


Рис. 3. Зависимость кинематической вязкости глинистых растворов ν от времени вытекания 500 *см*³ раствора из вискозиметра СПВ-5:

X — точки, определенные опытом; числа у точек — значения $\frac{\tau_0}{\gamma}$.

Бурение водоносного горизонта продолжалось в течение 3 суток. Общее поглощение глинистого раствора за это время составило около 100 *м*³.

Расчет 1. Определяем коэффициент фильтрации глинистого раствора k_Φ' на основании формулы (11).

Величину $R_г$ определяем по формуле (15) для напорных вод при $V_р = 100$ *м*³, $M = 20$ *м* и принимая $\varphi = 0{,}005$, $R_г = 17{,}8$ *м*; $t = 1$ мин. $= \frac{1}{1440}$ суток; $h_2 - h_{о.н} = 20$ *м*; $h_1 - h_{о.н} = 17{,}5$ *м*, поскольку $h_{о.н} = 25$ *м*, считая от устья скважины.

$$k_\Phi' = K\frac{\gamma}{\mu} = \frac{0{,}1^2 \cdot 2{,}3 \lg \frac{17{,}8}{0{,}1}}{2{,}2\,\frac{1}{1440}}\, 2{,}3 \lg \frac{20}{17{,}5} = 0{,}25\ м/сутки.$$

2. Определяем кинематическую вязкость глинистого раствора. Принимая величину $\tau_0 = 0{,}03$ *г/см*², находим по графику рис. 3 для $T = 22$ сек. (интерполируя между линиями $\frac{\tau_0}{\gamma}$, равными 0,02 и 0,04 *см*) $\nu = 0{,}08$ *см*²/*сек*.

3. Определяем коэффициент водопроницаемости $k_ф$ по формуле (14):

$$k_ф = k_ф' \frac{\nu}{\nu_в}\ ;\ k_ф = 0{,}25\ \frac{0{,}08}{0{,}013} = 1{,}55\ м/сутки.$$

Заключение

Рекомендуемый способ ориентировочного определения коэффициента водопроницаемости на основании поглощения промывочной жидкости позволяет только грубо оценивать степень водопроницаемости пород. Результаты определений могут искажаться вследствие явлений, не поддающихся количественному учету (например, кольматации трещин, оседания частиц глинистого раствора в период поглощения, изменения вязкости и сопротивления сдвигу раствора по разным причинам). Возможные ошибки должны быть почти исключительно в сторону занижения величин коэффициента водопроницаемости. Наименее надежные данные должны получаться при преобладании в породе тонких трещин, которые при малых напорах могут вовсе не проводить глинистого раствора. Для подобных пород рассматриваемый способ, очевидно, неприменим.

Несмотря на недочеты, метод определения коэффициента водопроницаемости по поглощению промывочной жидкости дает возможность получить примерную количественную оценку степени проницаемости путем крайне простых наблюдений, производимых при бурении разведочных (не гидрогеологических) скважин с глинистой промывкой. Этот метод применим для пород, пересеченных крупными трещинами и обладающих значительной проницаемостью, а также, по-видимому, для закарствованных пород, т. е. для пород, водоносность которых имеет наибольшее практическое значение.

Рекомендуемый метод целесообразен, например, при разведке и гидрогеологических исследованиях месторождений полезных ископаемых. В подобном случае значительное число грубо ориентировочных значений коэффициентов водопроницаемости, полученных на основании поглощения промывочной жидкости в разведочных скважинах, дает возможность более обоснованно наметить характерные участки для заложения гидрогеологических скважин. Кроме того, ориентировочные величины коэффициента водопроницаемости вместе с более точными значениями, полученными при опытных гидрогеологических работах, должны облегчить и сделать более надежным установление средних значений, предназначенных для гидрогеологических расчетов.

Следующим этапом работы, необходимым для оценки условий применения, дальнейшей разработки и внедрения, должна быть проверка метода в полевых условиях.

Использованная литература

1. Павловский И. Н. Гидравлический справочник. ОНТИ, 1937.
2. Щелкачев В. Н. и Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949.
3. Щелкачев В. Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостоптехиздат, 1948.
4. Шищенко Р. И. Гидравлика глинистых растворов. Азнефтеиздат, 1951.
5. Шищенко Р. И. и Бакланов Б. Д. Азербайджанское нефтяное хозяйство. 1932, № 7.
6. Керкис Е. Е. К вопросу о движении подземных вод в трещиноватых породах. Зап. ЛГИ, 1948, т. XXII.
7. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. Углетехиздат, 1955.