*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLIV, вып. 2, 1962 г.*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РАДИУСА ВЛИЯНИЯ ПРИ ОТКАЧКЕ ИЗ НАПОРНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

*Е. Е. Керкис*

В случае откачки из напорного водоносного горизонта при динамическом уровне воды, расположенном выше его кровли, в период неустановившегося притока воды к буровой скважине откачиваемая вода получается за счет «упругого запаса» (рассматривается водоносный горизонт, не сообщающийся на площади депрессионной воронки с другими водоносными пластами или поверхностными водоемами). «Упругий запас», по В. Н. Щелкачеву [1], представляет собой объем воды, вытесняемый в скважину при упругом расширении воды и водоносных пород вследствие понижения давления в области депрессии.

В период неустановившегося движения подземных вод депрессионная воронка постепенно расширяется, причем размеры ее в этот период приблизительно отвечают *приведенному, неустановившемуся радиусу влияния* $R$ [3]. Величина радиуса характеризует установившийся приток воды к колодцу при строго радиальном движении и отсутствии питания водоносного горизонта в области депрессии. Определение приведенного радиуса влияния позволяет применять при гидрогеологических расчетах формулу Дюпюи для движения подземных вод, отклоняющегося от радиального, и, в частности, для неустановившегося движения, при котором расход воды возрастает в направлении к колодцу или скважине.

Коэффициент водопроницаемости, по данным откачек из одиночных скважин при неустановившемся движении, может быть рассчитан по формуле Дюпюи, если величина $R$ в этой формуле представляет собой приведенный неустановившийся радиус влияния.

При удаленности опытной скважины от области питания или участков, где возможен приток воды из других водоносных горизонтов или поверхностных водоемов, период неустановившегося движения может быть довольно продолжительным, значительно превышающим обычную продолжительность пробных, а иногда и опытных откачек. Поэтому в подобных случаях расчет коэффициента фильтрации по формуле Дюпюи и с подстановкой приведенного неустановившегося радиуса влияния будет более правильным, чем подстановка радиуса влияния, определенного по эмпирическим формулам (например, Зихардта) или взятого из таблиц, и т. п. Если имеются исходные данные, позволяющие определить приведенный радиус влияния более или менее надежно, продолжительность пробной откачки, проводимой для определения коэффициента водопроницаемости, может быть значительно сокращена, т. е. откачка

может быть прекращена при явно неустановившемся движении (если имеет место практическое постоянство расхода воды в течение всего времени откачки).

В основу определения приведенного неустановившегося радиуса влияния при откачке из напорного водоносного горизонта принята следующая зависимость для пласта неограниченного распространения, относящаяся к вертикальному линейному стоку, в качестве которого рассматривается буровая скважина [1]:

$$S_c = -\frac{Q\mu}{4\pi KM\gamma} Ei\left(\frac{r_c^2}{4\chi t}\right), \tag{1}$$

где $S_c$ — понижение пьезометрического уровня;
$Q$ — расход жидкости (постоянный от начала откачки);
$\mu$ — абсолютная вязкость жидкости;
$K$ — коэффициент проницаемости горных пород;
$\gamma$ — вес единицы объема жидкости;
$M$ — мощность водоносного горизонта;
$r_c$ — радиус скважины;
$\chi$ — коэффициент пьезопроводности пласта;
$t$ — время от начала откачки;
$Ei$ — интегральная показательная функция.

Коэффициент пьезопроводности

$$\chi = \frac{K}{\mu(n\beta_ж + \beta_c)}, \tag{2}$$

где $n$ — пористость;
$\beta_ж$ — коэффициент сжимаемости жидкости;
$\beta_c$ — коэффициент сжимаемости пористой среды, т. е. минералов, образующих скелет породы.

В формуле (2) приняты следующие обозначения: $K$, *д* (дарси); $\mu$, *спз* (сантипаузы); $t$, *сек*; $\beta_ж$ и $\beta_c$ $1/атм$; $\chi$, $см^2/сек$.

Для определения приведенного радиуса влияния $R$ приравняем значения $S_c$ по формуле Дюпюи для напорных вод значению $S_c$ по формуле (1):

$$S_c = \frac{Q\mu \ln\frac{R}{r_c}}{2\pi KM\gamma} = -\frac{Q\mu}{4\pi KM\gamma} Ei\left(-\frac{r_c^2}{4\chi t}\right), \tag{3}$$

откуда

$$\ln\frac{R}{r_c} = -\frac{1}{2} Ei\left(-\frac{r_c^2}{4\chi t}\right). \tag{4}$$

Выражение (4) можно значительно упростить, пользуясь приближенным выражением функции $Ei$. Для малых значений аргумента

$$Ei(-x) = 0{,}5772 + \ln x - x. \tag{5}$$

Формулой (5) можно пользоваться при значениях $x$ настолько малых, что величинами порядка $x^2$ можно пренебречь. При радиусе скважины около 10 *см*, значении $\chi$ всего $10^3$ $см^2/сек$ и промежутке времени $t$ от начала откачки 1000 *сек* (т. е. менее 20 *мин*) величина $x = \frac{r_c^2}{4\chi t} = \frac{1}{40000}$, при больших значениях $\chi$ и $t$ значения $x$ будут еще меньшими. Следовательно, величиной $x^2$ можно почти всегда пренебречь.

Подставляя приближенное значение $Ei$ в формулу (4), получаем

$$\ln\frac{R}{r_c} = -0{,}2885 - 0{,}5\ln\frac{r_c^2}{4\chi t} + \frac{r_c^2}{8\chi t}.$$

Переходя к десятичным логарифмам, после преобразований имеем

$$\lg R = \lg\left(1{,}5\sqrt{\chi t} + \frac{r_c^2}{18{,}4\chi t}\right). \qquad (6)$$

Отбрасывая второй член выражения (6), обычно малый по сравнению с первым, получаем

$$R \approx 1{,}5\sqrt{\chi t}. \qquad (7)$$

Для гидрогеологических расчетов удобнее в формуле (7) выразить величину $\chi$ через коэффициент фильтрации $k$ в метрах в сутки и время $t$ — в сутках. Учитывая, что

$$K = k\frac{\mu}{\gamma} = k\frac{\mu}{g\rho}$$

($\rho$ — плотность воды, $г/см^3$), и принимая во внимание, что 1 дарси $= 1/\partial\ 10^{-5}\ см^2$, после преобразования выражения (7) получаем

$$R = 4{,}75\sqrt{\frac{kt}{\rho(n\beta_ж + \beta_c)}}. \qquad (8)$$

Величина коэффициента сжимаемости $\beta_ж$ для пресной воды может быть принята равной $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ $1/атм$. Коэффициенты сжимаемости скелета твердых пород $\beta_c$, по литературным данным, колеблются от $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ $1/атм$. Для слабосцементированных пород значения, $\beta_c$, вероятно, от $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ $1/атм$. Для наиболее сжимаемых рыхлых пород $\beta_c$, по-видимому, могут достигать $2 \cdot 10^{-4}$ $1/атм$. Обозначая через $b$ величину коэффициента сжимаемости пористой среды $\beta_c$, умноженную на $10^5$, и подставляя эту величину и величину коэффициента сжимаемости воды $4 \cdot 5 \cdot 10^{-5}$ в формулу (8), а также полагая $\rho = 1$ $г/см^3$, получаем

$$R = 1500\sqrt{\frac{kt}{4{,}5n + b}}, \qquad (9)$$

где величины $b$, отвечающие значениям $\beta_c$, приведенным выше, могут колебаться в следующих пределах:

| | |
|---|---|
| Для твердых пород . . . . . | От 0,5 до 2 |
| Для зернистых, слабосцементированных пород (главным образом дочетвертичного возраста) . . . . . | От 2 до 10 |
| Для несцементированных, зернистых пород, главным образом четвертичного возраста, содержащих пылеватые и глинистые частицы . . . . . | От 10 до 20 (предположительно) |

Формула (8) дает возможность определить приведенный неустановившийся радиус влияния для различных моментов времени от начала откачки на основании величины пористости пород и значений коэффициента сжимаемости их скелета. При отсутствии конкретных данных о сжимаемости скелета радиус влияния может быть рассчитан по формуле (9) на основании значений $b$.

Величину $R$ можно также определить по формуле (6) или (7), если величина коэффициента пьезопроводности определена по данным полевых опытных гидрогеологических работ. Необходимо только иметь в виду, что в формулах (6) и (7) единицами измерения являются сантиметры и секунды, а в формулах (8) и (9) — метры и сутки.

Формула (9) показывает, что неустановившийся радиус влияния для напорных вод зависит только от коэффициента водопроницаемости,

пористости и сжимаемости пород и воды. От мощности напорного водоносного горизонта $R$ не зависит.

**Примеры расчета** I. Примем: $k = 5$ *м/сутки*; $n = 0{,}2$; породы — слабосцементированные песчаники; $b = 5$, т. е. $\beta_c = 5 \cdot 10^{-5}$ *1/amu*; $t = 1$ сутки.

По формуле (9)

$$R = 1500 \sqrt{\frac{5 \cdot 1}{4{,}5 \cdot 0{,}2 + 5}} = 1380 \text{ м}.$$

Если принять меньшее значение $b = 2$, получаем $R = 1970$ *м*, т. е. величину того же порядка.

II. Коэффициент пьезопроводности, установленный опытным путем (породы — песчаники), $\chi = 2 \cdot 10^4$ *см²/сек*; $t = 2$ *ч*.

По формуле (7)

$$R = 1{,}5 \sqrt{2 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 3600} = 1{,}2 \cdot 10^4 \text{ см}, \text{ или } 120 \text{ м}.$$

III. При откачке из одиночной скважины в районе г. Гатчина, вскрывшей напорный водоносный горизонт в нижнекембрийских слабосцементированных песчаниках (Гдовский водоносный горизонт), были получены следующие данные.

1. Через 2 *ч* от начала откачки: дебит 10 *л/сек*, или 864 *м³/сутки*; понижение уровня 7,6 *м*; удельный дебит $q \frac{864}{7{,}6} = 113$ *м³/сутки*.

2. Через 42 *ч* (1,75 суток) от начала откачки: дебит 8,3 *л/сек*, или 717 *м³/сутки*; понижение уровня 7,2 *м*; удельный дебит $\frac{717}{7{,}2} = 99{,}5$ *м³/сутки*.

Мощность водоносного горизонта $M = 17$ *м*; $r_c = 0{,}05$ *м*.

Рассчитываем $k$ по данным, полученным в результате двухчасовой откачки. Для этого решаем совместно следующие уравнения:

$$k = \frac{0{,}366\, q (\lg R - \lg r_c)}{M}, \tag{10}$$

$$R = 1500 \sqrt{\frac{kt}{4{,}5n + b}} = A\sqrt{kt}. \tag{11}$$

Для песчаников нижнекембрийского (Гдовского) водоносного горизонта $n = 0{,}2$; принимаем $b = 10$. Соответственно

$$A = \frac{1500}{4{,}5 \cdot 0{,}2 + 10} = 455.$$

Совместное решение уравнений (10) и (11) приводит к следующей зависимости:

$$k - 0{,}183 \frac{q}{M} \lg k = 0{,}366 \frac{q}{M} (\lg A + 0{,}5 \lg t - \lg r_c). \tag{12}$$

Подставляя в эту зависимость значения $q$, $M$ и $t$ для откачки в течение 2 *ч*, а также величины $A$ и $r_c$, имеем

$$k = 1{,}22 \lg k = 8{,}35.$$

Путем подбора получаем $k = 9{,}6$ *м/сутки*. Соответственно по формуле (11) $R = 405$ *м*.

Для 42-часовой откачки подстановка в зависимость (12) фактических данных приводит к уравнению

$$k = 1{,}07 \lg k = 8{,}74,$$

откуда $k = 9{,}8$ *м/сутки* и по формуле (11) $R = 1880$ *м*.

Таким образом, применяя для определения радиуса влияния формулу (9), получаем практически одинаковые значения коэффициента фильтрации по данным откачки, проведенной в течение 2 и 42 *ч*. Следовательно, продолжительность откачек, предназначенных только для определения коэффициента водопроницаемости, может быть сильно сокращена.

Отметим, что откачка, рассмотренная в настоящем примере, производилась не вполне равномерно, причем наблюдались колебания как дебита, так и понижения, а также постепенное понижение дебита за период откачки. Поэтому в формуле Дюпюи (10) величину $k$ целесообразно было выразить через удельный дебит. Откачка при постоянном дебите должна обеспечить лучшую сходимость значений $k$, рассчитанных на основании понижений для различных промежутков времени от начала откачки, поскольку формула (1) строго отвечает условию постоянного дебита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1959.
2. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949.
3. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. Углетехиздат, 1955.