

где  $Q_{\text{уэл. } k}$  - расчетные значения узлового расхода воды в  $k$ -ом узле;  $\sum_k l_k$  - сумма длин всех линий, примыкающих к рассматриваемому узлу;  $\Delta Q_{ij}$  - дополнительные поправки расходов воды в элементах узла, примыкающих со стороны  $i$ -й зоны сети;  $\Delta Q_{(i-1)j}$  то же, но в элементах узла, примыкающих со стороны  $i-1$ -й зоны.

Значения расходов  $\Delta Q_{ij}$  и  $\Delta Q_{(i-1)j}$  определяются по формуле (7). Скорректированные узловые расходы сети можно найти также и по более простой зависимости

$$Q_{\text{уэл. } k} = 0,5 \sum_k l_k (q_1 - \Delta \bar{q}_i + \Delta \bar{q}_{(i-1)}) \quad (9)$$

С учетом этих расходов дальнейший расчет сети может производиться известными в практике способами.

### Р е з ю м е

Рассматривается методика учета изменения коэффициента часовой неравномерности водопотребления в линиях водопроводных сетей с учетом требований СНиП-П-31-74. В основу методики положен способ корректировки узловых расходов сети в соответствии с числом жителей, обслуживаемых подходящими к узлам линиями.

### Л и т е р а т у р а

1. Андрияшев М.М. Расчет водопроводных сетей с учетом коэффициентов часовой неравномерности водопотребления. - "Водоснабжение и санитарная техника", 1974, № 11.
2. Гейнц В. Г. О нормах и коэффициентах неравномерности хозяйственно-питьевого водоснабжения. - "Водоснабжение и санитарная техника", 1969, № 10.
3. Мошнин Л.Ф. Расчет водопроводных сетей при переменном коэффициенте часовой неравномерности водопотребления. - "Водоснабжение и санитарная техника", 1974, № 11.
4. СНиП-П-31-74, М., 1975.

УДК 624.131.67 : 556.3

В.П. Старинский (канд. техн. наук)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ И УЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

В настоящее время с целью получения подземной воды для различных потребителей ежегодно вводится в эксплуатацию несколько десятков тысяч водозаборных скважин. В этих условиях

большое значение приобретают вопросы правильного проектирования и расчета этих сооружений и их элементов. Особое значение имеет правильный учет гидравлического сопротивления фильтров скважин. Несмотря на то, что по данному вопросу имеются достаточно обширные исследования [1 - 7], общепринятой методики определения сопротивления фильтра при проектировании скважин пока не существует, что вносит известную субъективность в расчеты водозаборных сооружений. Вместе с тем, основываясь на материалах проведенных исследований и существующей теории движения воды в пористых и трещиноватых средах, можно получить вполне приемлемую, на наш взгляд, методику определения этой величины. В частности, если фильтр скважины представить в виде системы концентрических слоев определенной проницаемости, а протекающий через него поток воды осесимметричным, то для любой цилиндрической поверхности радиусом  $r$  этого фильтра можно написать, что

$$Q = 2\bar{n} r l v_r, \quad (1)$$

где  $Q$  - дебит скважин;  $r$  - радиус рассматриваемой цилиндрической поверхности фильтра;  $v_r$  - средняя скорость движения воды через эту поверхность;  $l$  - длина рабочей части фильтра.

Скорость движения воды в фильтре  $v_r$  переменна вдоль радиуса. Ее величина определяется проницаемостью материала слоев фильтра и значением действующего в нем гидравлического градиента. Зависимость между этими элементами определяется характером движения воды в фильтре. При ламинарном движении она, как известно, линейна, при турбулентном же степенная. Поскольку большинство фильтров скважин работают в области турбулентного движения воды, то в дальнейшем будем считать, что

$$v_r = D i_r^n, \quad (2)$$

где  $D$  - параметр, характеризующий собой проницаемость слоя фильтра;  $i_r$  - гидравлический градиент в рассматриваемой поверхности фильтрации;  $n$  - показатель степени, меньший единицы.

Если представить  $i_r$  как  $dh/dr$ , то выражение (1) можно написать в виде

$$Q = 2\bar{n} r l D \left( \frac{dh}{dr} \right)^n. \quad (3)$$

После некоторого преобразования и разделения переменных оно может быть представлено в виде

$$(2\bar{n}lD)^{\frac{1}{n}} dh = Q^{\frac{1}{n}} \frac{dr}{r^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

или

$$(2\bar{n}lD)^m dh = Q^m \frac{dr}{r^m}, \quad (5)$$

где

$$m = \frac{1}{n} > 1.$$

Интегрируя это выражение в пределах от  $h_1$  до  $h_2$  для переменной  $dh$  и от  $r_1$  до  $r_2$  для переменной  $dr$ , получим

$$(2\bar{n}lD)^m (h_1 - h_2) = Q^m \left( \frac{1}{(m-1)r_2^{m-1}} - \frac{1}{(m-1)r_1^{m-1}} \right) \quad (6)$$

или

$$\Delta h (2\bar{n}lD)^m = \frac{Q^m}{m-1} \left( \frac{1}{r_2^{m-1}} - \frac{1}{r_1^{m-1}} \right). \quad (7)$$

Откуда потери напора в фильтре равны

$$\Delta h = \frac{\left( \frac{1}{r_2^{m-1}} - \frac{1}{r_1^{m-1}} \right)}{(m-1)(2\bar{n}lD)^m} Q^m. \quad (8)$$

Здесь  $\Delta h = h_1 - h_2$  представляет собой разницу уровней воды на внешнем и внутреннем контурах фильтра, выделенных соответственно радиусами  $r_1$  и  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ ).

Из полученной зависимости следует, что коэффициент гидравлического сопротивления рассматриваемого слоя фильтра равен

$$\psi = \frac{\left( \frac{1}{r_2^{m-1}} - \frac{1}{r_1^{m-1}} \right)}{(m-1)(2\bar{n}lD)^m}. \quad (9)$$

Естественно, что если фильтр скважины состоит из  $k$  слоев, то коэффициент его суммарного гидравлического сопротивления будет равен

$$\psi = \sum_{i=1}^k \frac{c_i \left( \frac{1}{r_2^{m-1}} - \frac{1}{r_1^{m-1}} \right)}{(m-1)(2\bar{n}lD_i)^m} =$$

$$= \frac{1}{(m-1)(2\bar{n})} \sum_{i=1}^k \frac{\left( \frac{1}{r_{i2}^{m-1}} - \frac{1}{r_{i1}^{m-1}} \right)}{D_i^m}, \quad (10)$$

где  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$  - соответственно внутренний и наружный радиусы рассматриваемых слоев фильтра;  $D_i$  - проницаемость рассматриваемых слоев фильтра;  $c_i$  - коэффициент, учитывающий возрастание сопротивления фильтра при контакте между его отдельными слоями.

В качестве рассматриваемых слоев фильтра принимается не только его обсыпка, но и сам каркас с сеткой, проволочной обмоткой и т.д. При этом их параметры  $D_i$  представляются как проницаемость некоторой эквивалентной пористой среды, которая обеспечивает те же потери в слое. Величины же  $r_{i1}$  и  $r_{i2}$  принимаются в соответствии с их действительными размерами. Коэффициент  $c_i$  для обычных контактирующихся слоев обсыпки ориентировочно можно принимать равным 1,2; - 1,5, а при контакте обсыпки с сеткой или с проволочной обмоткой на каркасе - 1,5; - 2,0. В остальных случаях величина этого коэффициента требует дополнительного исследования.

Полученная зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления фильтра справедлива для всех режимов движения в нем потока, при которых  $m > 1$ . В случае работы фильтра в квадратичной области сопротивлений, где  $m = 2$ , она приобретает вид

$$\psi = \frac{1}{4\bar{n}^2 l^2} \sum_{i=1}^k \frac{c_i (r_{i1} - r_{i2})}{r_{i1} r_{i2} D_i^2} = \frac{1}{4\bar{n}^2 l^2} \sum_{i=1}^k \frac{c_i \delta_i}{r_{i\text{ср}}^2 D_i^2}, \quad (11)$$

где  $\delta_i$  - толщина отдельных слоев фильтра;  $r_{i\text{ср}}$  - их средний радиус.

При ламинарном движении потока воды  $m = 1$  и зависимость (10) непригодна для определения коэффициента гидравлического сопротивления фильтров скважин. Поэтому данный случай должен быть рассмотрен отдельно. Если в основу решения задачи положить известный закон Дарси, то получим, что

$$v_r = D I_i = D \frac{dh}{dr}. \quad (12)$$

Тогда зависимость (1) представится как

$$Q = 2\bar{n}r_1D \frac{dh}{dr} . \quad (13)$$

После разделения переменных и интегрирования (12) в выбранных ранее пределах соответственно для  $dh$  и  $dr$  получим

$$2\bar{n}DI(h_1 - h_2) = Q \ln(r_1 - r_2), \quad (14)$$

откуда

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\bar{n}ID} Q. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что в случае ламинарного движения потока воды через фильтр скважины его коэффициент гидравлического сопротивления должен определяться по формуле

$$\psi = \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\bar{n}ID} . \quad (16)$$

Для многослойного фильтра этот коэффициент будет равен

$$\psi = \frac{1}{2\bar{n}I} \sum_{i=1}^k \frac{c_i \ln \frac{r_{i1}}{r_{i2}}}{D_i} . \quad (17)$$

Чтобы использовать полученные зависимости для конкретных расчетов при проектировании водозаборных скважин, рассмотрим методику определения параметра  $D_i$ . Как уже упоминалось, этот параметр характеризует проницаемость слоев фильтра. Поэтому его можно определить на основе данных различных исследователей, занимающихся вопросами фильтрации и сопротивления проницаемых пород. В частности, на основании данных Е.А. Замарина [8] о турбулентной фильтрации в пористых средах получаем

$$D_i = 1,73 \left( \frac{d_i}{90} \right)^m , \quad (18)$$

где  $d$  - средний диаметр частиц рассматриваемого  $i$ -го слоя фильтра, см;  $m$  - показатель степени, равный

$$m = \frac{0,8 + 2d_i}{0,8 + d_i} . \quad (19)$$

На основании данных, полученных С.В. Избашем [8] для крупнозернистых обсыпок фильтра, можно принять, что

$$D_i = \varepsilon \left( 20 - \frac{14}{d_i} \right) d_i^{m-3} \nu^{m-2}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon$  - пористость материала слоя фильтра;  $\nu$  - коэффициент вязкости воды,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $d_i$  - тот же средний диаметр частиц фильтрующей породы,  $\text{см}$ ;  $m$  - показатель степени, равный

$$m = 2 - \frac{0,34}{d_i^2}. \quad (21)$$

В случае ламинарного режима работы фильтра параметр  $D_i$  можно определить по одной из приведенных в [8] формул авторов. В частности, для песчаных слоев или обсыпок фильтра можно использовать зависимость Хазена [8], которая имеет вид

$$D = 0,75 c d^2 (0,70 + 0,03t), \quad (22)$$

где  $c$  - коэффициент, принимаемый равным 0,80 для плотных песков, 1,55 - для песков средней плотности и 2,0 - для песков из округленных частиц примерно одинакового диаметра;  $d$  - так называемый действующий диаметр частиц слоя,  $\text{см}$ , определяемый по методике отдельных авторов, изложенный в [8];  $t$  - температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ .

Е.А. Замарин [8] для этих же целей рекомендует использовать зависимость вида

$$D = \frac{8 \gamma^2 \varepsilon^3 d^2}{(1 - \varepsilon)^2}, \quad (23)$$

где  $\varepsilon$  - пористость материала;  $\gamma = (1,275 - 1,5) \varepsilon$ . Остальные величины прежние.

В отдельных случаях для определения  $D_i$  может быть использована также и формула В.С. Истоминой [8], имеющая вид

$$D = 0,078 \varepsilon d_0^2, \quad (24)$$

где  $d_0$  - средний диаметр пор обсыпки,  $\text{мм}$ .

Особо важное значение имеет правильное определение проницаемости отдельных видов каркасов фильтров. Ее можно найти, используя конкретные данные, приведенные в работе В. С. Алексеева и Е.А. Никольской [1]. В частности, анализ этих данных показывает, что проницаемость различных фильтров в

первую очередь зависит от их скважности и может быть представлена выражением вида

$$D = \beta \eta^{\alpha}, \quad (25)$$

где  $D$  – проницаемость фильтра, м/с;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей фильтра;  $\eta$  – скважность фильтра;  $\alpha$  – показатель степени, зависящей от типа и конструктивных особенностей фильтра.

Величины этих коэффициентов, полученные нами на основе использования приведенных в [1] данных, для некоторых типов фильтров содержатся в табл.1.

Используя данные табл.1, можно по зависимостям (9), (10), (11), (16) и (17) определить коэффициенты гидравлического сопротивления фильтров. В случае покрытия фильтров антикоррозийными материалами методом напыления расчетную проницаемость фильтра следует уменьшить на 10%.

Необходимо отметить, что в практике гидрогеологических расчетов водозабора подземных вод и их скважин обычно пользуются не рассмотренным видом коэффициента гидравлического

Таблица 1

№ п/п	Типы фильтров	Значения параметров	
		$\beta$	$\alpha$
1	2	3	4
1	Каркасно-проволочные фильтры с горизонтальными шелями	0,65	1,20
2	Фильтры-каркасы с вертикальными шелями из штампованных материалов или пластмассовых с фрезерованными отверстиями	0,105	1,00
3	Пластмассовые фильтры с горизонтальными фрезерованными отверстиями	0,003	0,30
4	Фильтры-каркасы из штампованных материалов с мостообразными отверстиями для отклонения гравия. Скважность определяется по площади боковых отверстий	0,045	0,70
5	Фильтры-каркасы из штампованных материалов с мостообразными отверстиями для отклонения гравия. Скважность определяется по общей площади отверстия	0,187	1,00
6	Шелевые фильтры с ребристой водоприемной поверхностью. Шели вертикальные	0,400	1,40
7	Шелевые фильтры с ребристой водоприемной поверхностью. Шели горизонтальные	0,130	1,00
8	Сетчатые фильтры из сеток квадратного плетения. Сетки киперного и галунного плетения к использованию не рекомендуются ввиду их большей плотности	0,105	1,00

сопротивления фильтров, а так называемым коэффициентом безразмерного сопротивления  $\xi_{\phi}$ , входящим в знаменатель зависимостей

$$Q = \frac{2 \bar{n} K M S}{N + \xi_1 + \xi_{\phi}}, \quad Q = \frac{\bar{n} K (2h_0 - S) S}{N + \xi_1 + \xi_{\phi}} = \frac{2 \bar{n} K (h_0 - \frac{S}{2}) S}{N + \xi_1 + \xi_{\phi}}, \quad (26)$$

для определения дебитов соответственно напорных и безнапорных скважин. Поэтому интерес представляют собой зависимости, устанавливающие взаимосвязь между коэффициентами  $\psi$  и  $\xi_{\phi}$ . Найдем их из условия, что потери напора в фильтре, определенные с помощью коэффициентов  $\psi$  и  $\xi_{\phi}$ , должны быть равными между собою.

Из выражения (26), в частности, видно, что для напорных скважин потери напора в фильтре, выраженные через коэффициент  $\xi_{\phi}$  из условия

$$S = S_{\text{пл}} + S_{\text{нес}} + \Delta h_{\phi} = \frac{N + \xi_1 + \xi_{\phi}}{2 \bar{n} K M} Q,$$

равны

$$\Delta h_{\phi} = \frac{\xi_{\phi}}{2 \bar{n} K M} Q. \quad (27)$$

С другой стороны, для турбулентного и ламинарного режимов движения воды в фильтре эти же потери могут быть представлены выражениями (8) и (15). Приравнивая их, получим, что для ламинарного режима движения воды в фильтрах напорных скважин

$$\xi_{\phi} = 2 \bar{n} K M \psi = \frac{K M}{1} \sum_{i=1}^k \frac{c_i \ln \frac{r_{i1}}{r_{i2}}}{D_i}, \quad (28)$$

для турбулентного

$$\xi_{\phi} = 2 \bar{n} K M \psi Q^{m-1} = \frac{2 \bar{n} K M}{(m-1)(2 \bar{n} l)} \sum_{i=1}^k \frac{c_i \left( \frac{1}{r_{i2}^{m-1}} - \frac{1}{r_{i1}^{m-1}} \right)}{D_i^m}, \quad (29)$$

и для турбулентного в области квадратичных сопротивлений

$$\xi_{\phi} = 2 \bar{n} K M \psi Q = \frac{K M Q}{2 \bar{n} l^2} \sum_{i=1}^k \frac{c_i \delta_i}{r_{i \text{ср}}^2 D_i}. \quad (30)$$

Здесь  $K$  - коэффициент фильтрации пород водоносного пласта;  $M$  - мощность пласта;  $Q$  - дебит скважины.

Зависимости (28) - (30) можно использовать также и для определения коэффициента  $\xi_{\phi}$  фильтров безнапорных скважин. В этом случае вместо мощности  $M$  напорного пласта подставляется мощность безнапорного, равная  $M = h_0 - \frac{S}{2}$ . Кроме того, учитывается, что рабочая длина фильтра безнапорных скважин переменна и зависит от  $S$ . Поэтому вместо значения  $l$  в выражениях (28) - (30) для напорных скважин представляется соответствующая ей величина  $l' = l_0 - S$  для безнапорных скважин, где  $l_0$  - рабочая длина фильтра, соответствующая нулевому понижению уровня воды в скважинах.

Таким образом, при наличии полной характеристики фильтра скважины и показателя режима движения через него фильтрационного потока всегда можно определить гидравлическое сопротивление фильтра и установить влияние его на работу скважины уже на стадии ее проектирования. Это в значительной мере повышает достоверность назначения параметров водозаборных сооружений и улучшает проектирование скважин. Вместе с тем анализ зависимости для определения  $\xi_{\phi}$  показывает, что в случае турбулентного движения воды через фильтр его коэффициент  $\xi_{\phi}$  зависит не только от характеристик фильтра, но и от величины расхода протекающей через фильтр воды. Это говорит о необходимости производить расчет дебитов скважин методом последовательного приближения, корректируя каждый раз и величину  $\xi_{\phi}$  в соответствии с полученным значением дебита скважины.

## Р е з ю м е

Рассматривается расчетный способ определения и учета в практике проектирования водозаборных скважин гидравлического сопротивления их фильтров. Рекомендуются расчетные зависимости получены путем рассмотрения гидравлических особенностей работы фильтров и обработки литературных данных о проницаемости фильтровых каркасов и их обсыпок.

## Л и т е р а т у р а

1. Алексеев В.С., Никольская Е.А. Зарубежный опыт конструирования и расчета фильтров скважин на воду. - В сб.: Инженерная геология. Гидрогеология. Т.2. М., 1972. 2. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в

недеформируемой пористой среде. М., 1953. 3. Бочеввер Ф. М., Алексеев В.С. Оценка сопротивления водозаборных скважин по опытным и эксплуатационным откачкам. - "Разведка и охрана недр", 1965, №3. 4. Васильев В.А., Шульгин Д.Ф. О работе фильтра буровой скважины. - "Механика и машиностроение", 1961, №1. 5. Веригин Н.Н. Кальматаж призабойной зоны скважины. - "Журн. прикладной механики и технической физики", 1964, №2. 6. Гаврилко В.М. Фильтры водозаборных, водопонижительных и гидрогеологических скважин. М., 1968. 7. Грикевич Э.А. Исследование гидравлического сопротивления фильтра. - "Изв. АН Латв. ССР", 1967, №12. 8. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М. - Л., 1957.

УДК 627.131:532.51.001.5

Н.Н. Хлапук, А.Ф. Дмитриев (канд. техн. наук)

## К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ МЕСТНОГО РАЗМЫВА В НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТАХ (ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА)

В настоящее время существует множество рекомендаций по расчету местных размывов, предложенных для различных условий и пределов применения. Нами детально проанализированы формулы, приведенные в работах [1 - 6, 8 - 11], полученные авторами для условий плоской задачи данного режима сопряжения бьефов, горизонтального прямоугольного призматического русла и несвязных грунтов.

Были приняты одинаковые для всех формул гидравлические условия: сжатое сечение донного гидравлического прыжка с глубиной  $h_1$  бралось за начало отсчета длины крепления  $l_k$ ; коэффициент затопления прыжка  $n_3 = 1,0$ , длина его  $l_n$  определялась по зависимости

$$l_n = 5(h'' - h_1), \quad (1)$$

где  $h''$  - вторая сопряженная глубина прыжка.

Неразмывающие скорости потока в условиях равномерного режима движения  $U_0$  и соответствующие им нормальные глубины  $H_0$  находились по методике В.С. Кнороза [7].