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

# О ФИЛЬТРАЦИИ ИЗ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

*В. И. Давидович*

**1. Некоторые методы расчета фильтрации из каналов.** При проектировании каналов трапецеидального очертания установление величины потери воды на фильтрацию имеет существенное значение. Для необлицованных каналов, к которым относится подавляющее большинство постоянных и временных ирригационных каналов, вопрос о величинах потерь обычно связан с определением расчетного расхода при различных режимах эксплуатации. Для каналов, предназначенных для других целей, находящихся до облицовки в стадии временной эксплуатации, величины потерь на фильтрацию играют известную роль в различных расчетах производства гидротехнических работ. Наконец, при искусственном кольматаже откосов и дна необлицованных каналов величина фильтрационного расхода также используется в соответствующих расчетах.

Естественно, что вопросам фильтрации воды из каналов, а также разработке мероприятий по борьбе с фильтрацией уделялось и уделяется значительное внимание. При этом можно указать на два основных метода определения указанных потерь.

*Первый метод* относится к области использования данных непосредственных наблюдений и основанных на них эмпирических формул. Наибольшее распространение в СССР получили формулы А. Н. Костякова [1].

*Второй метод* можно назвать расчетно-теоретическим. Он основан на использовании теории фильтрации и выводе соответствующих гидромеханических теоретических формул для условий установившейся фильтрации. К таким формулам относятся решения Н. Н. Павловского [3], В. В. Ведерникова [4, 12], С. Н. Нумерова [17], Ф. Б. Нельсон-Скорнякова [18].

Кроме того, существуют приемы расчета, основанные на использовании имеющихся решений. К ним в первую очередь следует отнести предложение А. А. Угинчуса [10].

Рассмотрим вкратце лишь те способы, которые предусматривают установившееся движение, поскольку оно имеет наиболее существенное значение в практике нормальной эксплуатации каналов. Далее затронем те случаи фильтрации из каналов, когда отсутствует подпор со стороны подземных вод или подземные воды дренируются. При этом будем иметь в виду фильтрацию в условиях «бесконечно» глубокого залегания подземных вод или такого их расположения, при котором

подземные воды не оказывают влияния на фильтрацию из канала. Такую фильтрацию Н. Н. Павловский назвал «свободной фильтрацией» — термин, достаточно прочно утвердившийся в соответствующей литературе.

*Метод А. Н. Костякова* основан на использовании результатов непосредственных наблюдений над потерями воды на фильтрацию в ирригационных каналах [1]. Эти результаты могут быть представлены в виде следующей эмпирической зависимости:

$$\sigma = \frac{A}{Qy}\,\%, \qquad (1)$$

где $\sigma$ — потери на 1 *пог. км* длины канала от протекающего в нем расхода $Q$ (*м*³/*сек*) %;

$A$ и $y$ — коэффициенты, которые зависят от грунтов, слагающих откосы и дно канала, следующим образом:

| | | |
|---|---|---|
| грунты легкопроницаемые . . . . | $A = 3{,}4$, | $y = 0{,}5$ |
| среднепроницаемые . . . . . | $A = 1{,}9$, | $y = 0{,}4$ |
| малопроницаемые . . . . . | $A = 0{,}7$, | $y = 0{,}3$ |

Достоинство формулы А. Н. Костякова, как и всякой эмпирической формулы, заключается в том, что она основана на результатах непосредственных наблюдений. Однако она не учитывает геологического строения пород, где протрассирован канал гидрогеологических условий (коэффициента фильтрации, положения уровня грунтовых вод), формы канала и других характеристик, которые необходимо учитывать при проектировании каналов.

Метод Н. Н. Павловского основан на гидромеханическом решении задач безнапорной фильтрации из открытых русел [2]. Данный метод дает конкретное решение для случая свободной фильтрации на бесконечность при условии, что очертание живого сечения этого русла соответствует «круговой основе формы» [3].

Указанное условие сводится к тому, что полученные решения для русел теоретического криволинейного очертания могут быть в известных пределах достаточно справедливы и для практических русел, в частности трапецеидального очертания (эти русла Н. Н. Павловский называет «сопряженными»). При этом имеется в виду (рис. 1), что положение уровня подземных вод не влияет на величину фильтрации из канала и фильтрация происходит в однородном грунте.

В результате Н. Н. Павловский получает следующее решение для величины расхода на фильтрацию:

$$q = k(B + 2h), \qquad (2)$$

где $q$ — расход на фильтрацию на 1 *пог. м* длины канала;
$k$ — коэффициент фильтрации однородного грунта;
$B$ — ширина канала поверху;
$h$ — глубина воды в канале.

Формула (2) обладает существенными достоинствами: она весьма проста, учитывает гидрогеологические характеристики грунтов, в которых происходит фильтрация, и в известной мере форму канала. Вместе с тем применение этой формулы для трапецеидальных русел ограничено:

она справедлива, по указанию Н. Н. Павловского, лишь для случая, когда

$$\beta_н = 0{,}375m - 0{,}41, \qquad (3)$$

где $\beta_н = \frac{b_н}{h}$ — ($b_н$ полуширина трапецеидального канала понизу, $h$ — глубина воды в канале);

$m = \operatorname{ctg}\varphi$ — коэффициент откоса канала.

Имея в виду обзначения рис. 1, условие (3) примет следующий вид:

$$\frac{b}{h} = 0{,}75m - 0{,}82. \qquad (4)$$

Если рассмотреть это условие в диапазоне наиболее употребительных в строительном деле коэффициентов откосов каналов (от 1 до 3), то величины $\frac{b}{h}$ примут следующие численные значения:

| $m$ | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{b}{h}$ | —0,07* | 0,305 | 0,68 | 1,055 | 1,43 |

При другой связи коэффициента откоса канала $m$ и соотношения $\frac{b}{h}$ формула (2) будет давать большие или меньшие отклонения величины фильтрационного расхода от той, которая предусмотрена заданной формой русла.

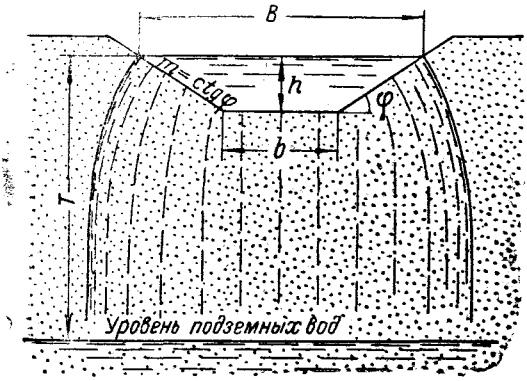



Рис. 1. Схема фильтрации из канала трапецеидального очертания при глубоком залегании уровня подземных вод

*Метод В. В. Ведерникова* основан на применении комплекса Н. Е. Жуковского и конформных отображений для решения задачи о фильтрации из каналов трапецеидального очертания [4]. При этом В. В. Ведерниковым рассматривается два случая залегания уровня подземных вод: в первом предусматривается «бесконечно» глубокое положение этого уровня, когда $T = \infty$ (рис. 1), не влияющее на истечение из канала; во втором имеется в виду сравнительно близкое залегание уровня подземных вод, влияющее на истечение из канала. Водопроницаемость грунта, в котором происходит фильтрация, т. е. коэффициент фильтрации, принимается постоянной.

Для случая бесконечно глубокого залегания уровня подземных вод В. В. Ведерников дает следующее решение величины расхода на фильтрацию:

$$q = k\left(B + 2h\frac{K}{K'}\right), \qquad (5)$$

где $K$ и $K'$ — полные эллиптические интегралы первого рода, численные значения которых зависят как от коэффициента откоса канала $m$, так и от соотношения $\frac{B}{h}$. Остальные обозначения прежние.

* По замечанию Н. Н. Павловского [3], отрицательное значение $\frac{b}{h}$ при $m=1$ имеет лишь формальное значение, так как в этом случае следует принимать $\frac{b}{h} = 0$, т. е. считать профиль канала треугольным.

В. В. Ведерников приводит таблицу значений $2\frac{K}{K'}$ в функции от $\frac{B}{h}$ при значениях $m$, равных 1,0; 1,5; 2,0, а также график, на котором представлены три кривые $2\frac{K}{K'}=f\left(\frac{B}{h}\right)$ при упомянутых значениях $m$ [4]. Эти графики и дают возможность подставлять в формулу (5) соответствующие значения $2\frac{K}{K'}$.

Способ В. В. Ведерникова по определению фильтрации из каналов получил широкое распространение, так как сравнительно простая формула (5) прямо учитывает форму трапецеидального канала, величину коэффициента его откоса и коэффициент фильтрации грунта. Однако при определении $q$ по формуле (5) необходимо пользоваться специальными таблицами или графиками. Это, естественно, ограничивает возможность правильного определения величин, входящих в выражение (5), так как работа В. В. Ведерникова, опубликованная в 1934 г., стала в настоящее время библиографической редкостью, а таблица значений $2\frac{K}{K}=f\left(\frac{B}{h}\right)$ в дальнейшем была воспроизведена лишь в работе П. Я. Полубариновой-Кочиной [6].

В капитальном «Справочнике по гидротехнике» [9] графики $2\frac{K}{K'}=f\left(\frac{B}{h}\right)$ представлены с крупной ошибкой — величины $2\frac{K}{K'}$ увеличены в 10 раз; в работе А. Н. Костякова [1] формула (5) приводится, но она не сопровождается ни соответствующими таблицами, ни графиками.

Расчет фильтрации из трапецеидальных каналов А. А. Угинчуса [10] основан на видоизменении формулы В. В. Ведерникова. По способу А. А. Угинчуса

$$q=k\alpha\chi, \qquad (6)$$

где $\chi=b+2h\sqrt{1+m^2}$ — смоченный периметр трапецеидального канала;

$\alpha=\frac{\beta+2m+A}{\beta+2\sqrt{1+m^2}}$ — коэффициент, зависящий от степени наполнения канала и его формы, а именно:

$$\beta=\frac{b}{h};\quad A=2\frac{K}{K'}=f\left(\frac{B}{h}\right).$$

А. А. Угинчус приводит график значения $\alpha=f\left(\frac{b}{h}\right)$, однако пользоваться им нельзя, так как не указаны значения коэффициента откоса $m$, для которых и составлен график [10]. По существу, способ А. А. Угинчуса лишь по-новому интерпретирует формулу В. В. Ведерникова, выражая фильтрационный расход $q$ в зависимости от смоченного периметра канала.

**2. Видоизменение формулы В. В. Ведерникова, наиболее удобное для расчета.** При проектировании трапецеидальных каналов, расчете устойчивости откосов и гидравлических расчетах, поскольку затрагиваются вопросы ф о р м ы каналов, обычно базируются на величинах $b$, $h$, $m$. Естественно поэтому привести и формулы фильтрационного расчета к наиболее удобному и привычному при проектировании трапецеидальных каналов виду, в котором фильтрационный расход выражался бы через эти же величины.

Как показывает практика выполнения различных фильтрационных расчетов, в том случае, когда величина фильтрационного расхода может быть выражена через элементы, характеризующие форму подземного

потока или пограничные условия, удобно пользоваться либо формулой типа $q = khq_r$ ($q_r$ — приведенный к напору фильтрационный расход), либо $q = kq_r$, ($q_r$ — фильтрационный расход, приведенный к коэффициенту фильтрации $k$.)

По решению В. В. Ведерникова,

$$q = k\left(B + 2\frac{K}{K'}h\right) = kq_r, \tag{7}$$

где

$$q_r = B + 2\frac{K}{K'}h. \tag{8}$$

С другой стороны, это решение определяется тем, что

$$q_r = \frac{\pi m}{\frac{\pi}{2} - \arcsin\theta}, \tag{9}$$

где $\theta$ — аргумент;

$\sin\theta = \lambda$ — модуль полного эллиптического интеграла $K$, входящего в выражение (8);

$\lambda' = \sqrt{1-\lambda^2}$ — дополнительный модуль эллиптического интеграла $K'$.

Обращаясь к формуле (8), выразим ширину канала поверху через $b$, $h$, $m$:

$$B = b + 2mh. \tag{10}$$

Следовательно,

$$q_r = b + 2mh + 2\frac{K}{K'}h = h\left(\frac{b}{h} + 2m + 2\frac{K}{K'}\right). \tag{11}$$

Вместо выражения (7) можно написать

$$q = khq_r = kh\left(\frac{b}{h} + 2m + 2\frac{K}{K'}\right), \tag{12}$$

где

$$q_r = \frac{b}{h} + 2m + 2\frac{K}{K'}. \tag{13}$$

Значение $q_r$ можно найти приравниванием (9) и (13):

$$\frac{b}{h} + 2m + 2\frac{K}{K'} = \frac{\pi m}{\frac{\pi}{2} - \arcsin\theta}, \tag{14}$$

при этом удобен следующий путь. По формуле (14)

$$\frac{b}{h} = \left(\frac{\pi}{\frac{\pi}{2} - \arcsin\theta} - 2\right)m - 2\frac{K}{K'}. \tag{15}$$

Задаваясь рядом последовательных значений $\theta$ (при некотором постоянном значении $m$), определим соответствующие значения $K$ и $K'$. Таким образом, при некотором $m$ каждому отношению $\frac{K}{K'}$ будет соответствовать одно значение $\frac{b}{h}$. Подставляя эти величины в формулу (13), можно найти $q_r$, как функцию отношения $\frac{b}{h}$ и $m$.

Вычисление $\frac{b}{h}$ по формуле (15) производилось следующим образом:[1] Аргумент эллиптических интегралов брался через 1°, величины же $K$ и $K'$ определялись по математическим таблицам [14]. Правая часть равенства (15) вычислялась с точностью до третьего знака после запятой, затем определялся приведенный расход $q_r$ по формуле (13).

Для удобства фильтрационных расчетов значения $q_r$ устанавливались линейной интерполяцией для $\frac{b}{h}$, меняющегося от 0 до 3 через 0,1, от 3 до 5 через 0,2, от 5 до 10 через 0,5 и от 10 до 50 через 1,0.

Вычисление выполнялось при следующих значениях $m$: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.

Таким образом, диапазон и интервал изменения $\frac{b}{h}$ и $m$ дали возможность практически вычислить $q_r$ для всех случаев, определяемых обычными задачами фильтрационных расчетов.

Значения $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$, представленные с точностью до 0,01 в прилагаемой таблице, не требуют специальных пояснений. Заметим лишь, что при необходимости определить $q_r$ для отношения $\frac{b}{h}$, находящегося между табличными значениями, следует пользоваться линейной интерполяцией. Связь $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$ представлена графически на рис. 2.

Итак, определение $q$ может быть произведено по формуле (12):

$$q = khq_r, \tag{16}$$

причем $q_r$ берется по таблице или графику по данным $\frac{b}{h}$ и $m$.

Пример 1. Определить фильтрационный расход (потери на фильтрацию) на 1 *пог. м* длины трапецеидального канала, ширина которого по дну 3,8 *м*, глубина наполнения 1,65 *м*, коэффициент откоса канала 2,0, коэффициент фильтрации пород, в которых проходит канал, 1,5 *м/сутки*.

Находим отношение $\frac{b}{h} = \frac{3{,}8}{1{,}65} = 2{,}3$, которому в таблице в графе $m=2$ соответствует значение $q_r = 8{,}36$. Подставляя эти данные в формулу (16), находим

$$q = 1{,}5 \cdot 1{,}65 \cdot 8{,}36 = 20{,}7 \ м^3/сутки \text{ на } 1 \ пог.\ м \text{ длины.}$$

Пример 2. Определить $q$ при следующих данных:

$$b = 14{,}0 \ м; \quad h = 0{,}85 \ м; \quad m = 3{,}0; \quad k = 1{,}5 \ м/сутки.$$

Находим $\frac{b}{h} = \frac{14{,}0}{0{,}85} = 16{,}5$. В таблице при $\frac{b}{h} = 16{,}0$ $q_r = 24{,}98$, при $\frac{b}{h} = 17{,}0$ — $q_r = 26{,}02$. Следовательно, значению $\frac{b}{h} = 16{,}5$ отвечает величина

$$q_r = \frac{24.98 + 26{,}02}{2} = 25{,}5.$$

Подставляя эти данные в выражение (16), находим

$$q = 1{,}5 \cdot 0{,}85 \cdot 25{,}5 = 32{,}5 \ м^3/сутки \text{ на } 1 \ пог.\ м \text{ длины.}$$

[1] В вычислении принимала участие инженер-гидрогеолог Н. И. Мурашкина.

**3. Приближенная формула определения фильтрации из каналов.** Как видно на графиках (рис. 2), связь $q = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$ определяется кривыми, близкими к прямым линиям. Пользуясь зависимостью (16) можно, по-видимому, величину $q_r$ представить в виде прямой, заменяющей с известным приближением кривые $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$, и тем установить приближенное значение $q_r$. Поскольку кривизна упомянутых кривых на различных участках различна, следует выбрать такой диапазон величин $\frac{b}{h}$, который охватывает наиболее важные и часто встречающиеся в практике случаи проектирования и эксплуатации каналов.

Так, П. Д. Глебов приводит данные из отечественной практики о находящихся в эксплуатации полевых оросителях, размеры которых

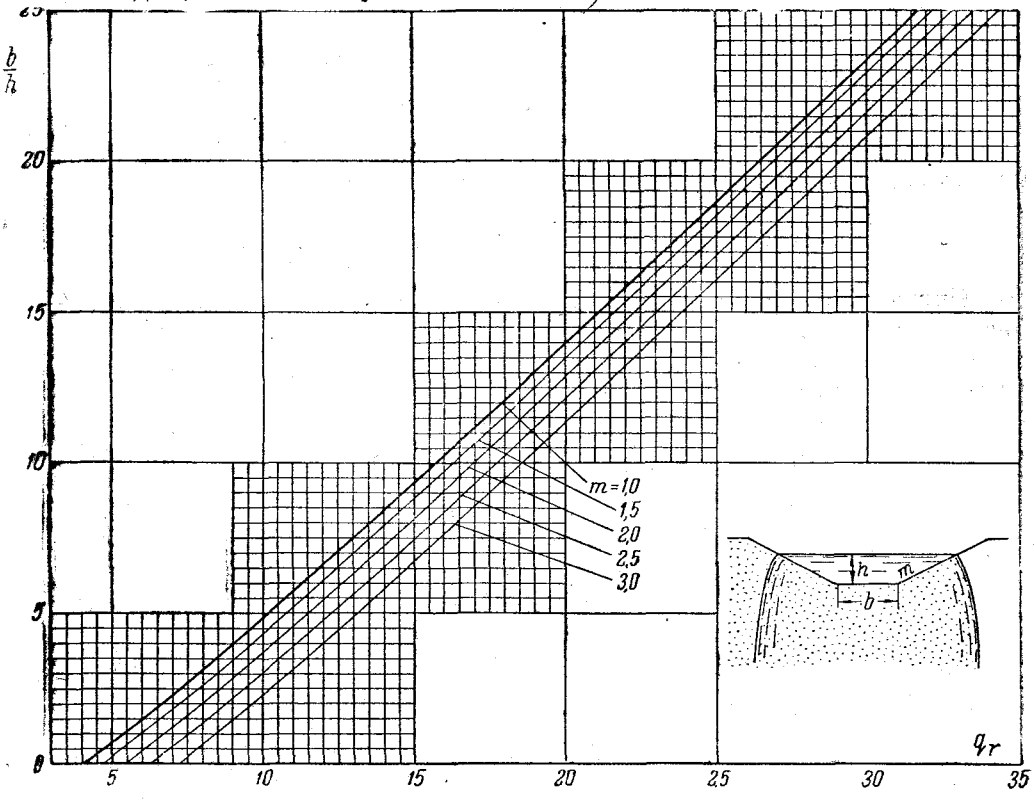



Рис. 2. График $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$ для определения $q_r$ по формуле $q = khq_r$

определялись различными типами канавокопателей [15]. По этим данным отношение $\frac{b}{h}$ колеблется от 1,0 до 2,5. По его же данным нормы Средазводпроиза для распределителей устанавливают пределы для $\frac{b}{h}$ от 1 до 6 и для оросителей 1,0.

А. Н. Костяков [1] при глубоком залегании грунтовых вод по минимуму потерь воды предлагает значение $\frac{b}{h} = 2\sqrt{1+m^2} - m$, что для обычных пределов коэффициента откоса $m$ от 1 до 3 определяет пределы для $\frac{b}{h}$ от 1,82 до 3,32.

По данным П. Д. Глебова [15], в Индии при постройке каналов, руководствуясь соображениями об устойчивости русла, величинам $\frac{b}{h}$ давали переменное зависимое от расходов значение от 3,5 до 6,0. В США сечение большинства каналов характеризуется значением $\frac{b}{h}=4-m$ что при обычных пределах для $m$ от 1 до 3 соответствует пределам $\frac{b}{h}$ от 1 до 3.

По данным американской практики, как сообщает Г. К. Ризенкампф [16], для типовых оросителей значения $\frac{b}{h}$ колеблются от 1 до 8.

Проектные материалы также показывают, что для каналов неирригационных (например, энергетических или предназначенных для спрямления русел рек) условия временной и постоянной эксплуатации характеризуют значения $\frac{b}{h}$, не выходящие за пределы 1—10.

В связи с изложенным нами рассмотрены участки кривых $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$ для $\frac{b}{h}$ от 1,0 до 10,0 и для $m$ от 1,0 до 3,0 и на основе их анализа предлагается приближенная зависимость

$$q_r = 1{,}15\frac{b}{h} + 1{,}5m + 2{,}79. \qquad (17)$$

Полученные по этой формуле значения $q_r$ весьма близки к вычисленным аналитически и представленным в таблице.

Таким образом, наше предложение окончательно сводится к рекомендации при определении потерь на фильтрацию из трапецеидальных каналов [соответственно (16) и (17)] пользоваться формулой

$$q = kh\left(1{,}15\frac{b}{h} + 1{,}5m + 2{,}79\right), \qquad (18)$$

где $q$ — потеря на фильтрацию на 1 *пог. м* длины канала, *м³/сутки*;
$k$ — коэффициент фильтрации, *м/сутки*;
$h$ — глубина наполнения канала, *м*;
$b$ — ширина понизу, *м*;
$m = \operatorname{ctg}\varphi$ — коэффициент откоса канала ($\varphi$ — угол, составленный откосом канала с горизонтом).

Решение (5) и предложение (18) предусматривают, как указано выше, «бесконечно глубокое» залегание уровня подземных вод. Обычно же подземные воды залегают на конечной глубине $T$ (см. рис. 1). Как показывает анализ, эти формулы могут быть применимы при $\frac{T}{h} \geqslant 10{,}0$. При этом в пределах указанного диапазона $\frac{b}{h}$ возможные отклонения значений $q$ от истинных пренебрежимо малы. При $m < 1$ (когда канал проходит в водопроницаемых породах, допускающих крутые откосы) полученным решением можно пользоваться лишь после специального анализа тех погрешностей, которые кроются в самой формуле (5), а следовательно, и в предложении (18).

Как показали результаты сопоставлений величин $q$, вычисленных по выражению (16) с использованием специальных таблиц или графиков и рассчитанных по формуле (18), для $1 < \frac{b}{h} < 10$ значения отличаются максимум на 2—3%.

Пример 3. Дано: $k = 1{,}0$ *м/сутки*; $h = 0{,}5$ *м*; $b = 1{,}25$ *м*; $m = 2{,}0$. Находим

$$\frac{b}{h} = \frac{1{,}25}{0{,}5} = 3{,}0.$$

По таблице $q_r = 9{,}2$ и по формуле (16)

$$q = 1{,}0 \cdot 0{,}5 \cdot 9{,}2 = 4{,}60 \text{ } м^3/сутки \text{ на 1 } пог.\ м.$$

По формуле (18)

$$q = 1{,}0 \cdot 0{,}5(1{,}15 \cdot 3{,}0 + 1{,}5 \cdot 2{,}0 + 2{,}79) = 4{,}62 \text{ } м^3/сутки \text{ на 1 } пог.\ м.$$

Расхождение

$$\Delta q = \frac{4{,}62 - 4{,}60}{4{,}60} 100 = 0{,}5\%.$$

Пример 4. Дано: $k = 1{,}0$ *м/сутки*; $h = 1{,}5$ *м*; $b = 12{,}0$ *м*; $m = 3{,}0$. Находим

$$\frac{b}{h} = \frac{12}{1{,}5} = 8{,}0.$$

По таблице, $q_r = 16{,}42$ и по формуле (16)

$$q = 1{,}0 \cdot 1{,}5 \cdot 16{,}42 = 24{,}63 \text{ } м^3/сутки \text{ на 1 } пог.\ м.$$

По формуле (18)

$$q = 1{,}0 \cdot 1{,}5(1{,}15 \cdot 8{,}0 + 1{,}5 \cdot 3{,}0 + 2{,}79) = 24{,}73 \text{ } м^3/сутки \text{ на 1 } пог.\ м.$$

Расхождение

$$\Delta q = \frac{24{,}73 - 24{,}63}{24{,}63} 100 = 0{,}5\%.$$

Приведенные примеры показывают, что приближенная формула (18) дает вполне удовлетворительные результаты и освобождает от необходимости при фильтрационных расчетах пользоваться какими-либо таблицами или графиками.

Формулой (18) можно пользоваться и при отношении $\frac{b}{h} > 10{,}0$ и $\frac{b}{h} < 1{,}0$, но отклонение от результатов вычислений по выражению (16) в этом случае может быть несколько больше, чем это было показано в примерах 3—4.

Определим значение $q$ по формуле (18) по данным примера 2:

$$q = 1{,}5 \cdot 0{,}85(1{,}15 \cdot 16{,}5 + 1{,}5 \cdot 3{,}0 + 2{,}79) = 33{,}5 \text{ } м^3/сутки \text{ на 1 } пог.\ м.$$

Расхождение с данными примера 2

$$\Delta q = \frac{33{,}5 - 32{,}5}{32{,}5} 100 = 3\%.$$

Было бы целесообразно разработать также простые и удобные формулы и для более сложных случаев расчета фильтрации из каналов, когда водоупорная граница залегает сравнительно неглубоко и влияет на характер фильтрации или когда фильтрационный поток из канала дренируется естественными или искусственными дренами и т. п.

Таблица

**Значение $q_r = f\left(\frac{b}{h}, m\right)$ для определения $q$ по формуле $q = khq_r$**

| $\frac{b}{h}$ | $q_r$ при $m$ | | | | | $\frac{b}{h}$ | $q_r$ при $m$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 0 | 4,00 | 4,60 | 5,38 | 6,23 | 7,13 | 8,0 | 13,62 | 14,14 | 14,84 | 15,60 | 16,42 |
| 0,1 | 4,15 | 4,75 | 5,53 | 6,38 | 7,28 | 8,5 | 14,17 | 14,70 | 15,39 | 16,14 | 16,97 |
| 0,2 | 4,30 | 4,90 | 5,67 | 6,52 | 7,42 | 9,0 | 14,72 | 15,26 | 15,94 | 16,70 | 17,52 |
| 0,3 | 4,45 | 5,04 | 5,81 | 6,66 | 7,55 | 9,5 | 15,26 | 15,80 | 16,48 | 17,24 | 18,08 |
| 0,4 | 4,60 | 5,18 | 5,95 | 6,80 | 7,68 | 10,0 | 15,77 | 16,30 | 17,02 | 17,77 | 18,60 |
| 0,5 | 4,74 | 5,32 | 6,09 | 6,93 | 7,82 | 11,0 | 16,88 | 17,39 | 18,12 | 18,85 | 19,65 |
| 0,6 | 4,88 | 5,46 | 6,22 | 7,06 | 7,94 | 12,0 | 17,98 | 18,48 | 19,16 | 19,93 | 20,73 |
| 0,7 | 5,01 | 5,60 | 6,36 | 7,19 | 8,07 | 13,0 | 19,05 | 19,57 | 20,22 | 21,00 | 21,80 |
| 0,8 | 5,15 | 5,73 | 6,49 | 7,32 | 8,20 | 14,0 | 20,08 | 20,65 | 21,20 | 22,05 | 22,85 |
| 0,9 | 5,29 | 5,87 | 6,62 | 7,45 | 8,33 | 15,0 | 21,17 | 21,60 | 22,29 | 23,11 | 23,92 |
| 1,0 | 5,42 | 6,00 | 6,75 | 7,58 | 8,45 | 16,0 | 22,25 | 22,75 | 23,41 | 24,19 | 24,98 |
| 1,1 | 5,55 | 6,13 | 6,88 | 7,70 | 8,58 | 17,0 | 23,30 | 23,80 | 24,49 | 25,26 | 26,02 |
| 1,2 | 5,69 | 6,26 | 7,00 | 7,83 | 8,71 | 18,0 | 24,36 | 24,84 | 25,53 | 26,30 | 27,09 |
| 1,3 | 5,81 | 6,39 | 7,13 | 7,95 | 8,83 | 19,0 | 25,42 | 25,86 | 26,58 | 27,33 | 28,14 |
| 1,4 | 5,94 | 6,52 | 7,26 | 8,07 | 8,95 | 20,0 | 26,47 | 26,90 | 27,64 | 28,40 | 29,20 |
| 1,5 | 6,07 | 6,68 | 7,38 | 8,20 | 9,07 | 20,0 | 26,47 | 26,90 | 27,64 | 28,40 | 29,20 |
| 1,6 | 6,20 | 6,77 | 7,51 | 8,32 | 9,20 | 21,0 | 27,52 | 28,00 | 28,69 | 29,43 | 30,25 |
| 1,7 | 6,33 | 6,87 | 7,63 | 8,45 | 9,32 | 22,0 | 28,57 | 29,06 | 29,74 | 30,47 | 31,28 |
| 1,8 | 6,46 | 7,02 | 7,76 | 8,57 | 9,44 | 23,0 | 29,63 | 30,11 | 30,78 | 31,50 | 32,31 |
| 1,9 | 6,58 | 7,14 | 7,88 | 8,69 | 9,55 | 24,0 | 30,67 | 31,13 | 31,82 | 32,55 | 33,35 |
| 2,0 | 6,71 | 7,26 | 8,00 | 8,82 | 9,67 | 25,0 | 31,73 | 32,17 | 32,87 | 33,60 | 34,40 |
| 2,1 | 6,82 | 7,39 | 8,12 | 8,93 | 9,79 | 26,0 | 32,75 | 33,20 | 33,90 | 34,64 | 35,43 |
| 2,2 | 6,95 | 7,52 | 8,24 | 9,06 | 9,91 | 27,0 | 33,80 | 34,27 | 34,95 | 35,68 | 36,48 |
| 2,3 | 7,07 | 7,63 | 8,36 | 9,17 | 10,03 | 28,0 | 34,80 | 35,21 | 35,99 | 36,72 | 37,52 |
| 2,4 | 7,20 | 7,75 | 8,48 | 9,29 | 10,15 | 29,0 | 35,70 | 36,55 | 37,03 | 37,75 | 38,57 |
| 2,5 | 7,33 | 7,88 | 8,60 | 9,41 | 10,27 | 30,0 | 36,80 | 37,39 | 38,05 | 38,78 | 39,57 |
| 2,6 | 7,45 | 8,00 | 8,72 | 9,53 | 10,39 | 31,0 | 37,90 | 38,42 | 39,07 | 39,80 | 40,60 |
| 2,7 | 7,56 | 8,12 | 8,84 | 9,64 | 10,50 | 32,0 | 38,90 | 39,47 | 40,10 | 40,83 | 41,63 |
| 2,8 | 7,68 | 8,24 | 8,96 | 9,76 | 10,62 | 33,0 | 40,00 | 40,50 | 41,15 | 41,85 | 42,66 |
| 2,9 | 7,79 | 8,36 | 9,08 | 9,88 | 10,74 | 34,0 | 41,05 | 41,52 | 42,20 | 42,87 | 43,70 |
| 3,0 | 7,92 | 8,48 | 9,20 | 10,00 | 10,85 | 35,0 | 42,10 | 42,54 | 43,50 | 43,95 | 44,72 |
| 3,0 | 7,92 | 8,48 | 9,20 | 10,00 | 10,85 | 36,0 | 43,25 | 43,59 | 44,25 | 45,00 | 45,75 |
| 3,2 | 8,17 | 8,71 | 9,43 | 10,15 | 11,08 | 37,0 | 44,20 | 44,62 | 45,27 | 46,01 | 46,78 |
| 3,4 | 8,40 | 8,95 | 9,67 | 10,46 | 11,31 | 38,0 | 45,20 | 45,60 | 46,30 | 47,03 | 47,82 |
| 3,6 | 8,63 | 9,19 | 9,90 | 10,69 | 11,54 | 39,0 | 46,20 | 46,65 | 47,35 | 48,05 | 48,85 |
| 3,8 | 8,82 | 9,42 | 10,13 | 10,92 | 11,77 | 40,0 | 47,30 | 47,70 | 48,35 | 49,07 | 49,89 |
| 4,0 | 9,00 | 9,64 | 10,36 | 11,16 | 12,00 | 41,0 | 48,35 | 48,20 | 49,37 | 50,09 | 50,92 |
| 4,2 | 9,34 | 9,88 | 10,59 | 11,39 | 12,23 | 42,0 | 49,40 | 49,70 | 50,40 | 51,12 | 51,95 |
| 4,4 | 9,56 | 10,54 | 10,82 | 11,61 | 12,51 | 43,0 | 50,45 | 50,80 | 51,43 | 52,15 | 52,98 |
| 4,6 | 9,80 | 10,26 | 11,04 | 11,84 | 12,68 | 44,0 | 51,55 | 51,80 | 52,42 | 53,18 | 53,99 |
| 4,8 | 10,03 | 10,56 | 11,26 | 12,06 | 12,90 | 45,0 | 52,60 | 52,85 | 53,45 | 54,20 | 55,00 |
| 5,0 | 10,26 | 10,80 | 11,50 | 12,28 | 13,13 | 46,0 | 53,65 | 53,80 | 54,47 | 55,22 | 56,01 |
| 5,5 | 10,83 | 11,36 | 12,18 | 12,85 | 13,69 | 47,0 | 54,70 | 54,90 | 55,50 | 56,25 | 57,02 |
| 6,0 | 11,37 | 11,92 | 12,62 | 13,40 | 14,25 | 48,0 | 55,80 | 55,90 | 56,03 | 57,27 | 58,04 |
| 6,5 | 11,95 | 12,47 | 13,30 | 13,96 | 14,80 | 49,0 | 56,45 | 56,95 | 57,53 | 58,28 | 59,06 |
| 7,0 | 12,51 | 13,03 | 13,74 | 14,52 | 15,33 | 50,0 | 57,48 | 58,30 | 58,65 | 59,33 | 60,12 |
| 7,5 | 13,80 | 13,59 | 14,29 | 15,06 | 15,88 | | | | | | |

## Использованная литература


1. Костяков А. Н. Основы мелиорации. Сельхозгиз, 1951.
2. Павловский Н. Н. Основы метода гидромеханического решения задачи о свободной фильтрации из открытых русел. Изв. Научно-исследовательского ин-та гидротехники, 1936, т. XIX.
3. Павловский Н. Н. Свободная фильтрация на бесконечность из открытых русел с круговой основной формы. Изв. Научно-исследовательского ин-та гидротехники, 1936, т. XIX.
4. Ведерников В. В. Фильтрация из каналов. Госстройиздат, 1934.
5. Аравин В. И. и Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Госстройиздат, 1955.
6. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Гостехтеоретиздат, 1952.
7. Инженерно-геологические исследования для гидроэнергетического строительства (методическое руководство). Т. I, Госгеолтехиздат, 1950.
8. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Деривационные каналы гидроэлектростанций, ч. 2. Приложения. Госэнергоиздат, 1948.
9. Справочник по гидротехнике. Госстройиздат, 1955.
10. Угинчус А. А. Каналы и сооружения на них. Госстройиздат, 1953.
11. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ, Углетехиздат, 1951.
12. Ведерников В. В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. Госстройиздат, 1939.
13. Аравин В. И. и Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехтеориздат, 1958.
14. Сегал Б. И. и Семендяев К. А. Пятизначные математические таблицы. Изд-во АН СССР, 1950.
15. Глебов П. Д. Курс ирригации. ОНТИ, 1933.
16. Ризенкампф Г. К. Основы ирригации. Изд. Научно-мелиорационного ин-та, 1925.
17. Нумеров С. Н. О фильтрации из каналов деривационных ГЭС и ирригационных систем. Изв. Научно-исследовательского ин-та гидротехники, 1947, т. 34.
18. Нельсон-Скорняков Ф. Б. Фильтрация в однородной среде, изд. 2-е. Изд-во «Советская наука», 1949.