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

ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

В. И. Давидович

Всесоюзная научно-техническая конференция (г. Ленинград, 1957 г.) по проектированию осушительных мероприятий на обводненных угольных месторождениях отметила значительные успехи в проектировании осушительных мероприятий, связанных с соответствующими горнотехническими работами. Вместе с тем было фиксировано внимание научно-технической общественности на целом ряде существенных недостатков, связанных с проектированием осушительных работ. Так, например, было отмечено, что проектирование горных работ часто ведется без учета гидрогеологических особенностей месторождения и возможности их осушения, поэтому проектные решения по осушению нередко сложны. Методика гидрогеологических расчетов и получение исходных расчетных параметров для осушения до сих пор еще недостаточно разработаны для сложных гидрогеологических условий.

Нередко методы гидрогеологических расчетов весьма трудоемки, в то время как проектирование осушительных мероприятий на некоторых стадиях требует хотя и приближенных, но быстрых решений.

В настоящей работе даются приближенные решения при определении водопритоков в горизонтальные несовершенные горные выработки, находящиеся в различных гидрологических условиях. Рассматривается приток в условиях *безнапорного* движения подземных вод для слабого и крутого уклонов водоупора водоносного горизонта и приток в условиях *напорного* движения подземных вод.

Многообразие природных гидрогеологических условий усложняет разработку методики гидрогеологических расчетов и, в частности, определение водопритоков в горные выработки. Поэтому рассмотрим сначала водоприток при сравнительно простых исходных данных: однородности пород водоносного горизонта в условиях установившегося плоско-параллельного движения. Предполагается известной ширина зоны влияния выработки (аналогичная радиусу влияния при радиальном движении), заранее определенная либо по расчетным формулам, либо на основании непосредственных гидрогеологических наблюдений.

I. ПРИТОК К НЕСОВЕРШЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ НАПОРНО-БЕЗНАПОРНОГО РЕЖИМА

1. Приток в горную выработку в условиях горизонтального водоупора

Рассмотрим горизонтальную горную выработку (рис. 1, *а*). Протяженность ее в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, достаточно велика; приток воды в выработку справа и слева можно рассматривать в условиях плоской задачи. Выработка расположена в водоносном пласте мощностью M, причем кровля и почва пласта —

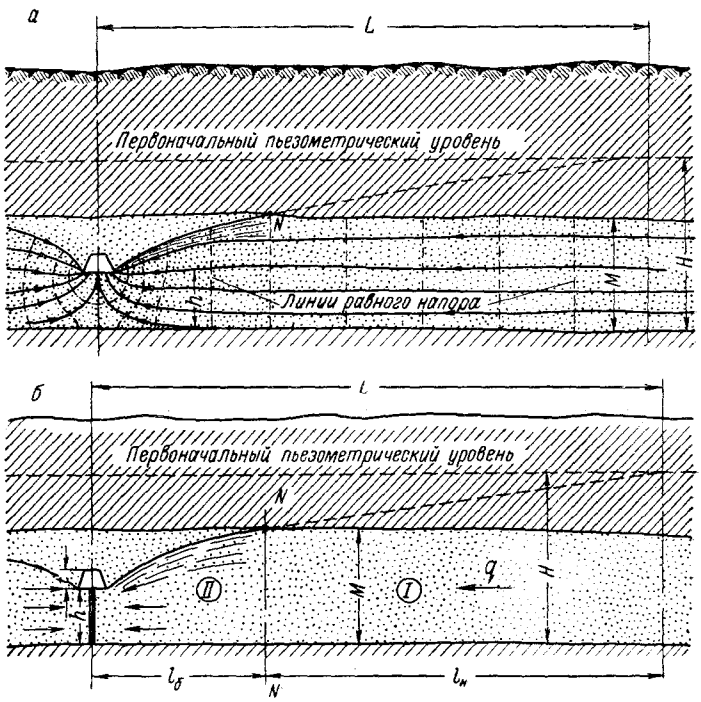


Рис. 1. Схема притока в горизонтальную горную выработку:
а — расчетная; *б* — упрощенная

горизонтальные. Пьезометрический напор водоносного горизонта характеризуется величиной H, подошва выработки расположена на высоте h над почвой пласта, коэффициент фильтрации породы принимается постоянным.

Предполагая удаление воды из выработки (например, путем откачки), рассмотрим стационарные условия притока в нее подземных вод из водоносного горизонта. При установившемся движении схема притока в выработку с обеих сторон будет одинаковой; следовательно, движение будет симметричным.

Предварительные опыты по методу электрогидродинамических аналогий показали следующее (рис. 1, *а*). Если L — ширина полосы питания или соответственно расстояние до контура области питания, то, схематизируя явление движения воды в пласте, можно наметить две области движения: напорную и безнапорную. В области напорного движения (движение принимается горизонтальным) пьезометрический напор падает вдоль движения от значения H до M в точке N. Здесь подземный поток «отрывается» от кровли пласта и дальше характеризуется как безнапорный. Депрессионная поверхность криволиней-

ного очертания опускается практически до подошвы выработки. Между вертикалью, проходящей через точку N, и горной выработкой линии равных напоров криволинейны. Вода поступает через подошву снизу симметрично с левой и правой сторон.

Схематизируем этот процесс притока следующим образом (рис. 1, *б*). Область поступления подземной воды в горную выработку заменим проходящей через ее ось узкой щелью, доходящей до водоупора. Вода в этой щели поддерживается на уровне пола выработки; поступление подземной воды в щель — горизонтальное. Остальные условия те же, что и на рис. 1, *а*.

Схематизированный процесс притока отличается от действительного лишь в области, близ лежащей к горной выработке. Принимаемое выпрямленное очертание траекторий движения по сравнению с действительным свидетельствует о некотором запасе в величине фильтрационного расхода. В самом деле: криволинейность линий токов близ выработки определяет большее сопротивление, а следовательно, меньший фильтрационный расход, чем при схеме рис. 1, *б*.

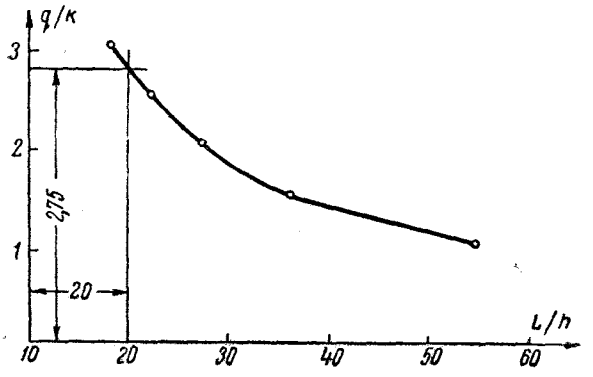


Рис. 2. График $\frac{L}{h} = f\left(\frac{q}{k}\right)$ для определения q

В этом случае весь подземный поток может быть разбит на два фрагмента: I — напорный длиной $l_н$; II — безнапорный длиной $l_б$. Граница между ними — вертикаль N—N — проходит через точку отрыва депрессионной поверхности от кровли водоносного пласта мощностью M.

Итак, для напорного фрагмента

$$\frac{q}{k} = M\frac{H-M}{l_н} = M\frac{H-M}{L-l_б}, \qquad (1)$$

где H — первоначальный пьезометрический уровень;
k — коэффициент фильтрации породы водоносного пласта;
q — единичный расход.

Для безнапорного фрагмента

$$\frac{q}{k} = \frac{M^2-h^2}{2l_б}. \qquad (2)$$

Из выражения (1) найдем

$$L - l_б = \frac{k}{q}M(H-M), \qquad (3)$$

а из выражения (2)

$$l_б = \frac{k}{2q}(M^2-h^2). \qquad (4)$$

Складывая уравнения (3) и (4), получим

$$L = \frac{k}{2q}(M^2-h^2) + \frac{k}{q}(MH-M^2), \qquad (5)$$

откуда односторонний приток в выработку

$$q = \frac{k}{2L}(2MH - M^2 - h^2). \qquad (6)$$

Имея в виду симметричность притока, найдем, что полный двусторонний приток будет в два раза больше одностороннего [по формуле (6)], т. е.

$$q = \frac{k}{L}(2MH - M^2 - h^2). \qquad (7)$$

При определении притока в горную выработку соответственно рис. 1 нередко пользуются методом С. Н. Нумерова [7] (например, [10, 12]):

$$\frac{L}{h} = \frac{2kM(H-M)}{qh} + \frac{2k}{q}(M-h)\left(1 + 0{,}5\frac{M-h}{h}\right) - \\ - \frac{2kh}{q} f_1\left(\frac{q}{kh}\right) - f_2\left(\frac{q}{kh}\right), \qquad (8)$$

где функции $f_1\left(\frac{q}{kh}\right)$ и $f_2\left(\frac{q}{kh}\right)$ находятся по специальным таблицам или графикам [1, 7, 10, 12].

Это уравнение решается подбором или графически и применимо в следующих случаях:

$$(H - h) \geqslant \frac{q}{k}; \qquad (9)$$

$$t \geqslant 0{,}22\frac{q}{k}, \qquad (10)$$

где t — высота выработки [по условию (10), незатопляемой].

Метод С. Н. Нумерова точный, он основан на гидромеханическом решении [6]. Для сопоставления результатов подсчетов по формуле (8) или приближенному решению (7) приведем несколько примеров.

Пример 1. Определить приток в горную выработку, расположенную выше горизонтального водоупора на $h=5$ *м*, если первоначальный напор $H=20$ *м*, мощность водоносного горизонта $M=10$ *м*, ширина полосы питания $L=100$ *м*, коэффициент фильтрации $k=1$ *м/сутки*. По уравнению (8)

$$\frac{L}{h} = \frac{55}{\frac{q}{k}} - \frac{2{,}5}{\frac{q}{k}} f_1\left(\frac{q}{5k}\right) - f_2\left(\frac{q}{5k}\right). \qquad (11)$$

Задаваясь рядом значений $\frac{q}{k}$, вычислим по формуле (11) соответствующие величины $\frac{L}{h}$:

$\frac{q}{k}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\frac{L}{h}$	54,6	36,1	27,1	21,7	18,0

По этим данным на рис. 2 построен график, откуда следует, что при $\frac{L}{h}=20$ искомое значение

$$\frac{q}{k} = 2{,}75.$$

По формуле (7)

$$\frac{q}{k} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 20 - 100 - 25}{100} = 2{,}75.$$

Аналогично выполнены еще четыре примера с разными значениями M, H, h и L. Поскольку принято $k=1$ *м/сутки*, численное значение q равно $\frac{q}{k}$. Результаты подсчетов сведены в табл 1.

Таблица 1

M, *м*	H, *м*	h, *м*	L, *м*	q, *м²/сутки*	
				по формуле (8)	по формуле (7)
10	20	5	100	2,75	2,75
10	20	9	100	2,00	2,19
10	50	5	200	4,15	4,37
20	25	18	200	1,12	1,38
10	30	8	200	2,10	2,18

Как и следовало ожидать, значения q, вычисленные по приближенной формуле (7), несколько превышают значения q по формуле (8). В то же время это расхождение невелико и, по-видимому, вполне допустимо, если учесть обычно недостаточно точное знание величины коэффициента фильтрации.

2. Приток в горную выработку в условиях крутого падения водоносного горизонта

В условиях крутого падения водоносного горизонта, когда параллельные кровля и почва пласта расположены под значительным углом φ к горизонту, в горную выработку, расположенную на высоте h над водоупором, приток может происходить по схеме рис. 3, *а*. В правой от оси выработки части *I* пласта приток происходит по прямому уклону $i>0$. Движение в пласте безнапорное, неравномерное, характеризуется наличием кривой спада. Обозначим через L_1 ту горизонтальную проекцию длины кривой спада, на протяжении которой депрессионная поверхность практически выклинивается и неравномерный режим переходит в равномерный с глубиной потока h_0.

Полагая, как и выше (в случае притока в горную выработку в условиях горизонтального водоупора), что поглощение притекающей в горную выработку воды происходит по некоторой условной вертикальной щели, проходящей через ось выработки и доходящей до водоупора, видим, что приток справа налево характеризуется как случай неравномерного движения по прямому уклону на протяжении l_1, причем

$$\frac{L_1}{l_1} = \cos\varphi. \qquad (12)$$

Начальная глубина потока на этом участке h_0, конечная — равна высоте расположения выработки над водоупором h. Рассматривая, как и выше, плоскую задачу, в дальнейшем установим величину единичного расхода q.

Приток в выработку с левой стороны *II* происходит по обратному уклону $i<0$. При этом здесь имеет место следующий процесс притока. В ближайшей к выработке зоне происходит неравномерное безнапорное движение. Кривая депрессии поднимается и на некотором расстоянии l

от выработки подходит в точке N к кровле водоносного пласта. Выше по течению поток движется, заполняя всю толщу M, и является напорным на протяжении $l_н$. Начало этого участка длиной $l_н$ лежит на расстоянии L_2 — ширины области питания части II, причем длина этого участка

$$l_2 = l_н + l_б. \tag{13}$$

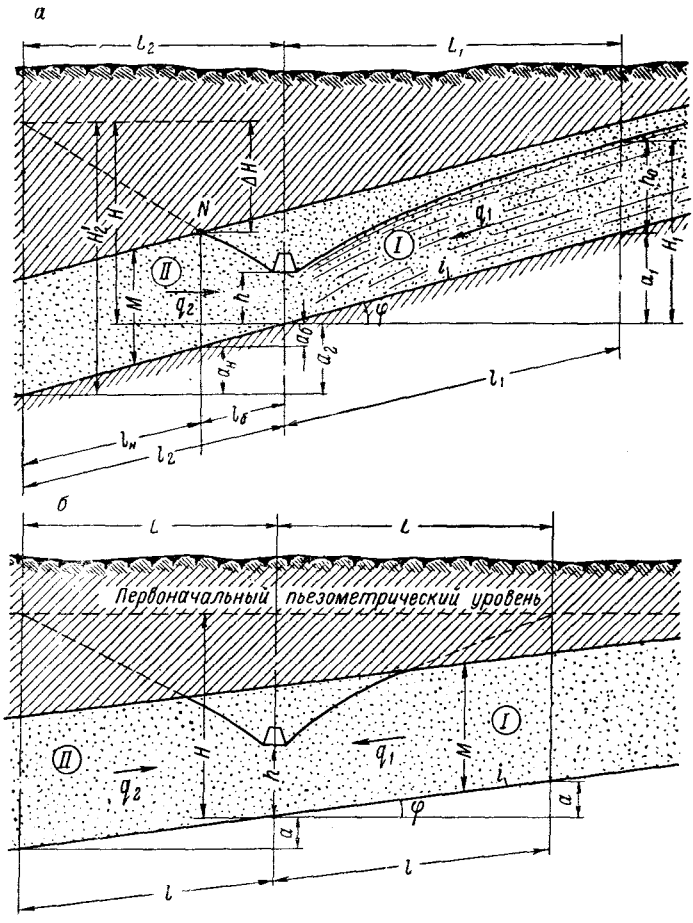


Рис. 3. Схема притока в выработку в условиях:
а — крутого падения водоносного горизонта; *б* — слабого уклона водоносного горизонта

Вместе с тем

$$\frac{L_2}{l_2} = \cos\varphi. \tag{14}$$

Единичным расходом на этом участке будет q_2, а полный, двусторонний приток

$$q = q_1 + q_2. \tag{15}$$

На участке I расход может быть определен приближенным приемом (см. рис. 3, *а*), предложенным Г. Н. Каменским [3],

$$q_1 = k\,\frac{h_0 + h}{2}\cdot\frac{h_0 - h + il_1}{l_1}. \tag{16}$$

Вместе с тем, поскольку

$$\frac{a_1}{l_1} = \sin\varphi = i \tag{17}$$

и

$$a_1 = il_1, \tag{18}$$

вместо выражения (16) имеем

$$q_1 = k\frac{h_0 + h}{2} \cdot \frac{h_0 - h + a_1}{l_1}. \tag{19}$$

Из рис. 3, *а* видно, что

$$h_0 + a_1 = H_1, \tag{20}$$

причем H_1 представляет собой напор, отсчитываемый от водоупора в створе выработки. Учитывая, что

$$l_1 = \frac{L_1}{\cos\varphi}, \tag{21}$$

перепишем формулу (19) в следующем виде:

$$q_1 = \frac{k\cos\varphi}{2L_1}(h_0 - h)(H_1 - h). \tag{22}$$

Определение притока на участке *II* подобно определению притока при горизонтальном водоупоре. Здесь также можно весь подземный поток разбить на два фрагмента: безнапорный и напорный. В безнапорном имеет место неравномерное движение при обратном уклоне, причем начальной мощностью потока (в точке *N*) в этом фрагменте будет мощность пласта *M*, конечной — глубина расположения выработки над водоупором *h*. Длина фрагмента $l_б$. Единичный расход по способу Г. Н. Каменского [3]

$$q_2 = k\frac{M + h}{2} \cdot \frac{M - h - il_б}{l_б}, \tag{23}$$

откуда длина безнапорного фрагмента $l_б$ после некоторых преобразований

$$l_б = \frac{M^2 - h^2}{2\frac{q_2}{k} + i(M + h)}. \tag{24}$$

В напорном фрагменте движение характеризуется формулой Дарси

$$q_2 = kM\frac{\Delta H}{l_н}, \tag{25}$$

где ΔH — падение напора на протяжении $l_н$.

Как видно из рис. 3, *а*,

$$\Delta H = H_2' - a_н - M \quad \text{и} \quad a_н = l_н i. \tag{26}$$

Таким образом, вместо формулы (25)

$$q_2 = kM\frac{H_2' - M - l_н i}{l_н}. \tag{27}$$

Выделяя $l_н$ из формулы (27) и складывая с $l_б$ по формуле (24), в соответствии с формулой (13) получим уравнение, решение которого относительно q_2 приводит к следующему результату:

$$q_2 = k\frac{\cos\varphi}{4L_2}(\sqrt{B^2 - D} - B), \tag{28}$$

где

$$D = 8a_2M(M + h)(h - H_2); \quad (29)$$

$$B = M^2 + h^2 - 2MH + a_2(M + h). \quad (30)$$

Пользование формулами (15), (22) и (28) поясним на следующем примере.

Пример 2 (см. рис. 3, *а*). По данным гидрогеологических исследований известны величины: $L_1 = 100$ *м*; $L_2 = 70$ *м*; $H = 75$ *м*; $\varphi = 30°$; $M = 20$ *м*; $h_0 = 15$ *м*; $h = 10$ *м*; $k = 1$ *м/сутки*; выработка находится в середине пласта.

Предварительно устанавливаем следующие величины:

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg} 30° = 0{,}577; \quad a_1 = L_1 \operatorname{tg}\varphi = 100 \cdot 0{,}577 = 57{,}7 \text{ м};$$

$$a_2 = L_2 \operatorname{tg}\varphi = 70 \cdot 0{,}577 = 40{,}3 \text{ м}; \quad H_1 = a_1 + h_0 = 57{,}7 + 15 = 72{,}7 \text{ м}.$$

Определим q_2, для этого вычислим B:
по выражению (30)

$$B = 20^2 + 10^2 - 2 \cdot 20 \cdot 75 + 40{,}3(20 + 10) = -12{,}9 \cdot 10^2;$$

по выражению (29)

$$D = 8 \cdot 40{,}3 \cdot 20(20 + 10)(10 - 75) = -1257 \cdot 10^4;$$

по выражению (28)

$$q_2 = 1\frac{0{,}866\sqrt{166 \cdot 10^4 + 1257 \cdot 10^4} + 12{,}9 \cdot 10^2}{4 \cdot 70} = 16{,}25 \text{ м}^2\text{/сутки};$$

по выражению (22)

$$q_1 = \frac{1 \cdot 0{,}866}{2 \cdot 100}(15 - 10)(72{,}7 - 10) = 1{,}35 \text{ м}^2\text{/сутки}.$$

Полный приток

$$q = 16{,}25 + 1{,}35 = 17{,}6 \text{ м}^2\text{/сутки}.$$

3. О притоке в горные выработки в условиях слабого уклона водоупора

При слабом уклоне i водоупора расчет притока в горизонтальную горную выработку может производиться так же, как и в условиях горизонтального водоупора [10, 12], поскольку в подавляющем большинстве гидрогеологических расчетов, связанных с движением подземных вод, наличием слабого уклона водоупора можно пренебрегать. Однако не всегда ясно, что считать слабым уклоном водоупора. М. В. Сыроватко [10] полагает, что если угол уклона водоупора $\varphi < 25°$, то расчетная схема притока в горную выработку может соответствовать случаю горизонтального водоупора $\varphi = 0$. Но величина этого угла φ автором не обоснована.

Физическая картина притока в горную выработку представлена на рис. 3, *б*. В отличие от рассмотренного выше случая крутого падения водопроницаемого пласта здесь картина притока в горную выработку симметрична: справа и слева — напорно-безнапорное движение. Ширина области питания L для левого и правого участков I и II может быть в практических расчетах принята одинаковой. Придерживаясь в этом случае той же расчетной схемы, что и выше, положим поступление всей подземной воды с обеих сторон выработки в условную вертикальную щель, прорезающую водоносный горизонт от подошвы выработки до водоупора.

Приток в выработку с обеих сторон определяется как

$$q = q_1 + q_2, \tag{31}$$

причем q_1 и q_2, соответственно рис. 3, *б*, являются притоками справа и слева. Придерживаясь того же вывода расчетных зависимостей, что и указанный выше, найдем приток справа из участка *I*

$$q_1 = \frac{k \cos \varphi}{4L} (\sqrt{B_1^2 - D_1} - B_1), \tag{32}$$

где

$$B_1 = M^2 + h^2 - 2MH - a(M + h); \tag{33}$$

$$D_1 = 8aM(M + h)(H - h). \tag{34}$$

Аналогично приток слева из участка *II*

$$q_2 = \frac{k \cos \varphi}{4L} (\sqrt{B_2^2 - D_2} - B_2), \tag{35}$$

где

$$B_2 = M^2 + h^2 - 2MH + a(M + h); \tag{36}$$

$$D_2 = 8aM(M + h)(h - H). \tag{37}$$

Суммируя по (31) величины притоков, окончательно получим

$$q = \frac{k \cos \varphi}{4L} (\sqrt{B_1^2 - D_1} + \sqrt{B_2^2 - D_2} - 2C), \tag{38}$$

где

$$C = M^2 + h^2 - 2MH. \tag{39}$$

Расчеты по формуле (38) поясним несколькими примерами.

Пример 3. Приток в горную выработку (см. рис. 3, *б*) происходит при ширине области питания $L = 100$ *м*, одинаковой для участков *I* и *II*. Мощность водоносного горизонта $M = 10$ *м*, выработка расположена на высоте $h = 5$ *м* над водоупором, уклон которого определяется углом падения $\tilde{\varphi} = 3°$. Первоначальный напор, отсчитываемый в створе выработки, $H = 20$ *м*, коэффициент фильтрации породы $k = 1$ *м/сутки*.

Предварительно определим некоторые постоянные величины:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} 3° = 0{,}05; \quad a = L \operatorname{tg} \varphi = 100 \cdot 0{,}05 = 5 \text{ м};$$

$$B_1 = 10 + 5 - 2 \cdot 10 \cdot 20 - 5(10 + 5) = -3{,}5 \cdot 10; \quad B_1^2 = 11{,}25 \cdot 10;$$

$$D_1 = 8 \cdot 5 \cdot 10(10 + 5)(20 - 5) = 9 \cdot 10;$$

$$C = 10 + 5 - 2 \cdot 10 \cdot 20 = -2{,}75 \cdot 10;$$

$$B_2 = 10 + 5 - 2 \cdot 10 \cdot 20 + 5(10 + 5) = -2 \cdot 10; \quad B_2^2 = 4 \cdot 10;$$

$$D_2 = 8 \cdot 5 \cdot 10(10 + 5)(5 - 20) = -9 \cdot 10.$$

Подставляя эти данные в формулу (38), найдем

$$q = \frac{1 \cdot 0{,}999}{4 \cdot 100} (\sqrt{11{,}25 \cdot 10 - 9 \cdot 10} +$$

$$+ \sqrt{4 \cdot 10 + 9 \cdot 10} + 2 \cdot 2{,}75 \cdot 10) = 2{,}65 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

Определим теперь приток в выработку, приняв, что водоупор залегает горизонтально.

Подставляя в формулу (7) цифровые значения k, L, M, H и h, получим

$$q = \frac{1}{100}(2 \cdot 10 \cdot 20 - 10 - 5) = 2{,}75 \ м^2/сутки.$$

Вычислим величину притока, руководствуясь решением (8). Подставляя в него все известные величины, найдем так же, как в примере 1, что $q = 2{,}6 \ м^2/сутки$.

Пример 4. Условия те же, что в примере 3, но угол падения уклона водоупора и кровли $\varphi = 5°40'$.

По формуле (38) $q = 2{,}54 \ м^2/сутки$. Если же не учитывать уклона, то, как и в предыдущем примере, по формуле (7) $q = 2{,}75 \ м^2/сутки$, по формуле (8) $q = 2{,}6 \ м^2/сутки$.

Таблица 2

Пример	q	%
	по формуле (38)	по формуле (7)
3	102	105,5
4	98	105,5
5	От 99,5 до 93,0	99,5

Пример 5. Соответственно рис 3, *б* рассмотрим влияние угла φ на величину расхода q, который подсчитаем, как и выше, тремя способами, по формулам (38), (7), (8). Исходные данные: $M = 10 \ м$; $h = 5 \ м$; $H = 80 \ м$; $L = 200 \ м$; $k = 1{,}0 \ м/сутки$. Угол падения φ меняется от 3 до 19°.

Результаты подсчетов q для ряда значений φ получены следующие:

φ	3°	6°	8°30′	11°30′	14°	16°40′	19°20′
q, $м^2/сутки$	7,37	7,32	7,27	7,19	7,11	7,00	6,88

Как видно из этих данных, с изменением φ расход q изменяется ничтожно. В самом деле, увеличение угла φ от 3 до 19°20′, т. е. более чем в шесть раз, при всех прочих равных условиях вызвало уменьшение расхода с 7,37 до 6,88 $м^2/сутки$, т. е. всего на 7%.

По формуле (7) $q = 7{,}37 \ м^2/сутки$, по формуле (8) $q = 7{,}4 \ м^2/сутки$.

Если в приведенных примерах полученные результаты сравнивать с решением (8) (по С. Н. Нумерову [7]) и принять вычисленную таким образом величину фильтрационного расхода за 100%, то результат этого сравнения, приведенный в табл. 2 позволяет сделать следующее заключение.

Подсчеты по формуле (8) значительно более трудоемки, чем по формулам (38) или (7). Вместе с тем приближенные решения по формулам (38) и (7) дают вполне удовлетворительную для практики точность. При слабом уклоне вычисления по формуле (38) учитывают влияние уклона водоупора. Однако при прочих равных условиях оно столь незначительно, что можно рекомендовать весьма простое выражение (7), в котором влияние уклона не учитывается.

4. О количественной характеристике слабого и крутого уклонов

Чтобы решить вопрос, как следует рассчитывать приток в горные выработки в зависимости от уклона — по формулам (15), (22) и (28), соответствующим крутому уклону, или по формулам (7) или (38) — слабый уклон, необходимо напомнить следующее.

М. В. Сыроватко [10] полагает, что в условиях крутого падения водоупорных пород (более 20—25°), вмещающих напорный водоносный горизонт, в котором проводится несовершенная горизонтальная выработка, может иметь место гидродинамическая схема (см. рис. 3, *а*). Особенностью этой схемы является сложность распределения фильтрационных токов: в правой части выработки возникает безнапорное движение, а в левой — смешанное (безнапорное и напорное).

С таким мнением можно согласиться лишь частично. Правильное представление о характере движения, которое может возникнуть (справа — безнапорное движение, слева — смешанное), не следует категорически связывать с величиной угла $\varphi=20$—$25°$. Как видно из рис. 4, возникновение того или иного вида движения зависит не только от угла падения водоупорных пород, но и от ширины зоны L, на которую распространяется влияние выработки. Можно указать три формы притока к горной выработке.

Первая форма *I* (рис. 4) характерна тем, что в пределах ширины L_I (от выработки до вертикали *1—1*) имеют место оба вида движения: напорный и безнапорный. По-видимому, такой случай в практике чаще

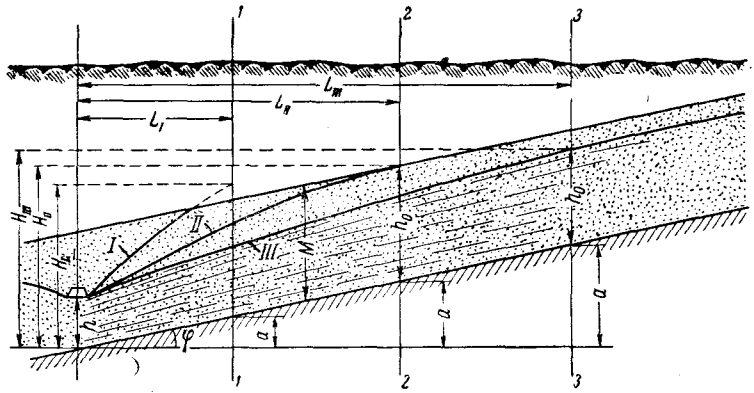


Рис. 4. Формы притока подземных вод к горной выработке (приток справа)

может встретиться при малых углах или горизонтальном залегании кровли и почвы водоносного горизонта.

Вторая форма *II* (рис. 4) характерна тем, что в пределах L_{II} (от выработки до вертикали *2—2*) имеет место лишь безнапорный режим. При этом от вертикали *2—2* и выше по течению практически наблюдается равномерное движение, глубина подземного потока равна мощности водоносного горизонта M и правее линии *2—2* является постоянной.

Третья форма *III* (рис. 4) характеризуется тем, что как в пределах L_{III} (от выработки до вертикали *3—3*), так и правее вертикали *3—3* имеет место безнапорный режим. Вертикаль *3—3*, соответствующая границе ширины зоны влияния L_{III}, одновременно является практической границей областей неравномерного и равномерного движений. Это наблюдается справа от вертикали *3—3* и характеризуется глубиной h_0, причем $h_0<M$. Очевидно, этот случай и имеет место при крутом залегании пород.

Нетрудно установить условия, при которых надлежит принимать ту или иную схему расчета. Обратимся к вертикали *2—2*. В этом случае $h_0=M$. Если при том же φ ширина полосы влияния будет больше, то $h_0<M$ и расчетная схема должна приниматься для крутого залегания водоносного пласта. Таким образом, предельным положением для этого случая является отношение

$$\frac{h_0}{M}=1. \tag{40}$$

Вместе с тем $h_0=H_{II}a$ (a — падение водоупора на протяжении величины L_{II}). Как видно из рис. 4,

$$a=L\operatorname{tg}\varphi. \tag{41}$$

Следовательно, предельное положение кривой депрессии по формуле (40)

$$\frac{H_{II} - L_{II} \operatorname{tg} \varphi}{M} = 1, \tag{42}$$

откуда крутой уклон имеет место при

$$\frac{H_{III} - L_{III} \operatorname{tg} \varphi}{M} < 1, \tag{43}$$

а слабый уклон при

$$\frac{H_I - L_I \operatorname{tg} \varphi}{M} > 1. \tag{44}$$

Окончательно можно сделать заключение: если

$$\operatorname{tg} \varphi < \frac{H - M}{L}, \tag{45}$$

то имеет место слабый уклон, т. е. расчетная схема должна соответствовать формулам (7) или (38); если же

$$\operatorname{tg} \varphi > \frac{H - M}{L}, \tag{46}$$

то имеет место крутой уклон, т. е. расчетная схема должна соответствовать формулам (15), (22) и (28).

Итак, как видно из рис. 1 и 3, при определении притока подземных вод в горизонтальную несовершенную выработку следует различать, когда уклон водоносного пласта горизонтален, т. е. $i=0$, и когда наклонен, т. е. $i > 0$. В последнем случае можно различать две расчетные схемы — слабого или крутого уклонов, $i = \operatorname{tg} \varphi$, определяемые условиями (45) и (46).

При слабом уклоне водоносного пласта или его горизонтальном залегании можно при определении водопритока в несовершенную выработку пользоваться приближенной формулой (7). Эта формула проста и в известных пределах дает результат, по сравнению с вычисленным по точным гидромеханическим решениям, вполне приемлемый. Анализ ряда вычисленных примеров показывает, что формула (7) может быть рекомендована при $\frac{L}{H}$, изменяющемся от 2,5 до 8,0, $\frac{H}{M}$, изменяющемся от 1,25 до 8,0, и $\frac{h}{H}$ от 0,5 до 0,9. Чем меньше отношение $\frac{h}{H}$, тем формула (7) дает более точные результаты.

При наличии слабого уклона можно пользоваться формулой (38), позволяющей при необходимости учесть уклон водоносного пласта. Но в этих условиях целесообразнее пользоваться более простой зависимостью (7); при этом получаемая точность совершенно достаточна для практики.

При крутом уклоне приток в горную выработку следует определять по формулам (15), (22) и (28).

II. ПРИТОК К НЕСОВЕРШЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ НАПОРНОГО ПОДЗЕМНОГО ПОТОКА

Схема притока в горную выработку (рис. 5) характеризуется следующими исходными положениями. Водоносный горизонт распространяется по всем направлениям в условиях постоянной мощности M. Водопроницаемость слагающих его пород постоянна и характеризуется коэф-

фициентом фильтрации k. Водоносный горизонт перекрыт практически водоупорными породами. Такими же породами представлена и его почва. Естественный пьезометрический уровень горизонтален или характеризуется весьма слабым уклоном и находится на уровне H над кровлей водоносного горизонта.

Горная выработка расположена в кровле водоносного пласта. Выработка горизонтальна или имеет слабый уклон (в направлении, перпендикулярном плоскости, рис. 5), длина ее l, ширина $в_0$. Поступление подземной воды через подошву выработки свободное с обеих сторон.

Рассмотрим случай, когда гидрогеологические условия питания водоносного горизонта определяют симметричную картину притока к выра-

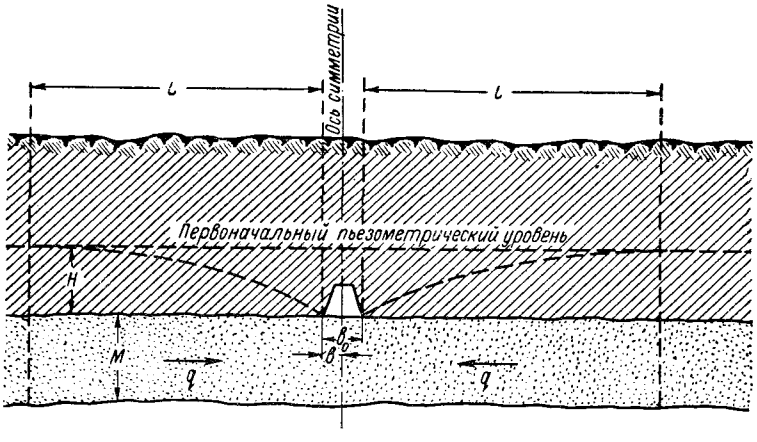


Рис. 5. Схема притока напорного подземного потока в горную выработку

ботке. Это, очевидно, возможно, когда ширина зоны влияния выработки L, обусловливаемая гидрогеологическими характеристиками притока к ней, может быть принята одинаковой.

В таких условиях можно рассматривать приток лишь с одной стороны выработки. Если полный приток подземных вод из водоносного горизонта в выработку на всей ее длине l будет Q, то приток, приходящийся на 1 *пог. м* длины выработки,

$$q_0 = \frac{Q}{l}, \tag{47}$$

где q_0 предусматривает двустороннее поступление подземной воды через подошву выработки.

Если рассматривать *односторонний* приток, то вследствие симметричности притока расход, приходящийся на 1 *пог. м* длины выработки,

$$q = \frac{q_0}{2}. \tag{48}$$

При этом область движения подземных вод, как видно из схемы рис. 6, ограничена с одной стороны осью симметрии, проходящей через центр выработки, с другой стороны — границей зоны влияния выработки, отстоящей на расстоянии L от ее края. Схема фильтрации показывает, что здесь имеет место напорная фильтрация в области, ограниченной параллельными водоупорными кровлей и почвой водоносного горизонта мощностью M. Выход фильтрационной воды в выработку

происходит на горизонтальном участке шириной $в = \frac{в_0}{2}$ ($в_0$ — ширина выработки, см. рис. 5).

Величина единичного расхода q может быть определена фрагментным методом Н. Н. Павловского [8, 13], согласно которому

$$q = \frac{kH}{\Phi}, \tag{49}$$

где H — разность напоров в начале и конце рассматриваемого участка водоносного горизонта длиной L;

$\Phi = \frac{1}{q_r}$ — так называемый «модуль формы» фрагмента, безразмерная величина, зависящая от формы области фильтрации (здесь q_r — приведенный расход).

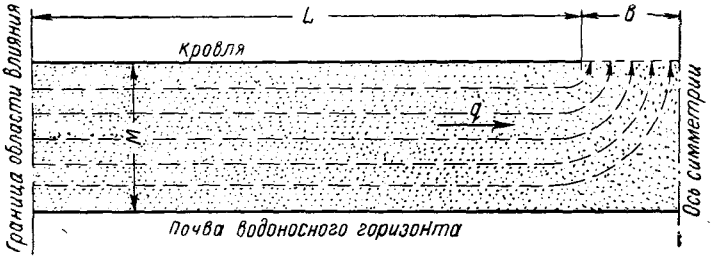


Рис. 6. Область и схема фильтрации при притоке напорных вод к горной выработке

Для фрагмента области фильтрации, представленной на рис. 6, используем следующее решение [1]:

$$\Phi = \frac{L}{M} - 1{,}47 \lg\left(Sh \frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M}\right), \tag{50}$$

где обозначения ясны из рис. 6 *.

Таким образом,

$$q = \frac{kH}{\frac{L}{M} - 1{,}47 \lg\left(Sh \frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M}\right)}, \tag{51}$$

где второй член в знаменателе представляет собой некоторую функцию от $\frac{в}{M}$. Обозначим

$$f\left(\frac{в}{M}\right) = 1{,}47 \lg\left(Sh \frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M}\right); \tag{52}$$

тогда (51) можно кратко записать так:

$$q = \frac{kH}{\frac{L}{M} - f\left(\frac{в}{M}\right)}. \tag{53}$$

Выражение (53) наглядно отражает природные условия притока к горной выработке. Если величина $в$ мала по сравнению с шириной зоны влияния L, то областью фильтрационного потока, близлежащей к выработке, можно пренебречь и полагать, что имеет место напорная филь-

* Выражение (50) справедливо при $L \geqslant M$.

трация в зоне мощностью M и длиной L. Следовательно, вместо (53) получим

$$q = \frac{kHM}{L}. \tag{54}$$

Если величиной $в$, по сравнению с L, пренебрегать нельзя, следует пользоваться общим видом выражения (53). Однако $f\left(\frac{в}{M}\right)$ по формуле (52) выражается сложно и для практических расчетов притока в горные выработки не всегда приемлема.

1. Функция $f\left(\frac{в}{M}\right)$

В общем случае притока в горную выработку отношение полуширины выработки $в$ к мощности водоносного горизонта может быть $\frac{в}{M} \gtrless 1$, а сама функция $f\left(\frac{в}{M}\right) \gtrless 0$.

Рассмотрим случай, когда $f\left(\frac{в}{M}\right) = 0$. Из формулы (52) следует, что это положение может иметь место при

$$\lg\left(Sh\frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M}\right) = 0, \tag{55}$$

что, в свою очередь, возможно при

$$Sh\frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M} = 1. \tag{56}$$

Следовательно,[1] в этом случае $\frac{в}{M} = 0{,}561$.

Таким образом,

при $\frac{в}{M} > 0{,}561$

$$f\left(\frac{в}{M}\right) > 0;$$

при $\frac{в}{M} < 0{,}561$

$$f\left(\frac{в}{M}\right) < 0.$$

Для определения самого характера $f\left(\frac{в}{M}\right)$ в табл. 3 приведены значения этой функции, вычисленные по формуле (52) в интервалах аргумента $0{,}02 < \frac{в}{M} < 2{,}0$.

Таблица 3

$\frac{в}{M}$	$f\left(\frac{в}{M}\right)$	$\frac{в}{M}$	$f\left(\frac{в}{M}\right)$	$\frac{в}{M}$	$f\left(\frac{в}{M}\right)$	$\frac{в}{M}$	$f\left(\frac{в}{M}\right)$
2,0	1,555	0,561	0	1,0	0,532	0,100	—1,175
1,8	1,360	0,500	—0,089	0,8	0,304	0,080	—1,330
1,6	1,155	0,400	—0,256	0,7	0,182	0,060	—1,510
1,4	0,955	0,300	—0,456	0,6	0,055	0,040	—1,765
1,2	0,748	0,200	—0,730	0,561	0	0,020	—2,220

[1] Например, по таблицам гиперболических функций [11].

По данным этой таблицы построен график (рис. 7) $f\left(\frac{в}{M}\right)$, на основании которого можно заключить следующее.

Функция $f\left(\frac{в}{M}\right)$ может быть $\gtrless 0$. При этом в диапазоне рассмотренных значений $2{,}0 > \frac{в}{M} > 0{,}02$, которые, очевидно, с избытком охватывают

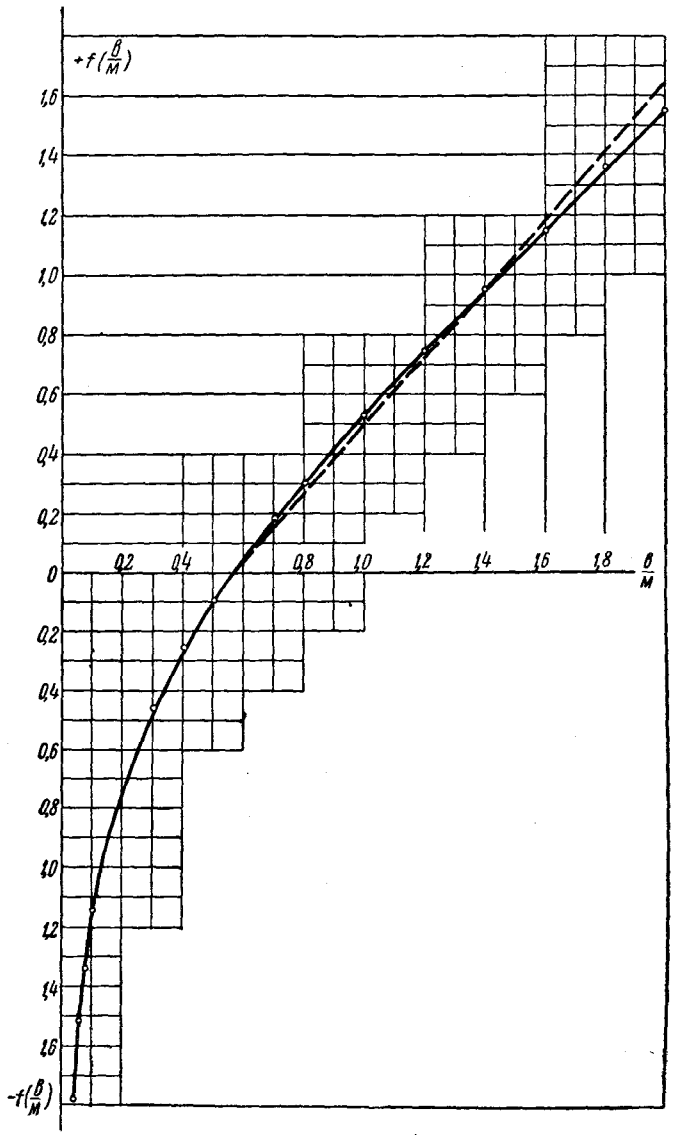


Рис. 7. График функции $f\left(\frac{в}{M}\right)$ по формуле (52)

встречающиеся на практике соотношения полуширины выработки к мощности водоносного горизонта; график функции $f\left(\frac{в}{M}\right)$ может быть разделен на две части. Одна часть графика соответствует положительному значению $f\left(\frac{в}{M}\right)$, что имеет место при $\frac{в}{M} > 0{,}561$. В этой части выпуклость кривой крайне незначительна.

Другая часть графика соответствует отрицательному значению $f\left(\frac{в}{M}\right)$, что имеет место при $\frac{в}{M}<0{,}561$. Эта часть графика характерна кривизной.

2. Приближенная формула для определения q при $\frac{в}{M} > 0{,}561$

Как видно на рис. 7, для значений $\frac{в}{M} > 0{,}561$ незначительная кривизна функции $f\left(\frac{в}{M}\right)$ дает возможность приближенно считать ее прямолинейной. Следовательно, в пределах для $0{,}561 < \frac{в}{M} < 2$

$$\frac{f\left(\frac{в}{M}\right)}{\frac{в}{M} - 0{,}561} = \frac{1{,}64}{2 - 0{,}56},$$

откуда

$$f\left(\frac{в}{M}\right) = 1{,}14\frac{в}{M} - 0{,}64. \tag{57}$$

Таким образом, по уравнению (53) расчетная формула приобретает вид

$$q = \frac{kH}{\frac{L}{M} - 1{,}14\frac{в}{M} + 0{,}64} \tag{58}$$

или

$$q = \frac{kHM}{L - 1{,}14в + 0{,}64M}. \tag{59}$$

Когда полуширина выработки $в$ невелика по сравнению с шириной области влияния L, величиной $1{,}14в$ можно пренебречь, и вместо формулы (59) получим

$$q = \frac{kHM}{L + 0{,}64M}. \tag{60}$$

Выражая фильтрационный расход через приведенный расход, в общем случае вместо формулы (49) получим

$$q = kHq_r, \tag{61}$$

причем по формуле (51)

$$q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - 1{,}47\lg\left(Sh\frac{\pi}{2}\cdot\frac{в}{M}\right)}, \tag{62}$$

или в соответствии с формулами (52) и (57)

$$q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - f\left(\frac{в}{M}\right)}. \tag{63}$$

Здесь $f\left(\frac{в}{M}\right)$ для $\frac{в}{M} > 0{,}561$ представлена в табл. 3.

Рассматривая параллельно расход по формуле (58) видим, что q_r может быть выражено значительно проще:

$$q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - 1{,}14\frac{в}{M} + 0{,}64}. \tag{64}$$

Сравним, насколько значения приведенного расхода q_r для диапазона $5<\frac{L}{M}<100$, вычисленные приближенно по формуле (64), отличаются от точных, но значительно более сложных, вычисленных по формуле (62).

Вычисления показали, что, *во-первых*, при $\frac{L}{M}>20$ в формуле (58) изменением члена, содержащего $\frac{в}{M}$, можно пренебречь по сравнению с $\frac{L}{M}$. При этом, принимая для рассматриваемого участка $0{,}561<\frac{в}{M}<2$, среднее значение

$$\frac{в}{M}=\frac{0{,}561+2}{2}=1{,}28.$$

Подставляя эту величину в формулу (64), найдем, что

$$q_r=\frac{1}{\frac{L}{M}-0{,}82}. \tag{65}$$

Таким образом, для $\frac{L}{M}>20$ и $0{,}561<\frac{b}{M}<2$

$$q=\frac{kH}{\frac{L}{M}-0{,}82}. \tag{66}$$

Во-вторых, для $5<\frac{L}{M}<20$ значения q_r, вычисленные по формуле (64), отличаются максимум на 3% от значений, вычисленных точным способом.

Заметим, что отношения $\frac{L}{M}$ и $\frac{в}{M}$, для которых производились вычисления, определяли собой и отношение $\frac{в}{L}$ (см. рис. 5).

Бóльшие значения $\frac{в}{L}$, видимо, соответствуют бóльшим выработкам: траншеям и котлованам, расположенным близ источников питания (озер, рек и т. п.). Рассматриваемые в настоящей работе выработки характеризуются незначительными абсолютными размерами $в$ и отношением $\frac{в}{L}$. Практика показывает, что в этих условиях значения $\frac{в}{L}>0{,}1$ встречаются редко. Поэтому приведенные выше результаты относятся к области отношений $\frac{в}{L}<0{,}1$.

3. Приближенные формулы для определения q при $\frac{в}{M}<0{,}561$

Если выражать фильтрационный расход по общей формуле (61), то точное решение для q_r, как указано выше, определяется по формулам (62) и (63), где $f\left(\frac{в}{M}\right)$ вычислено в табл. 3 и представлено на рис. 7.

Для упрощения $f\left(\frac{в}{M}\right)$ найдем кривую параболического типа

$$y=Ax^2+Bx+C, \tag{67}$$

которая будет отличаться от кривой $f\left(\frac{в}{M}\right)$ минимальной погрешностью.

Как известно из теории приближенного вычисления [5, 14, 15], нахождение такой кривой сводится к решению трех уравнений:

$$A\sum x_k^4 + B\sum x_k^3 + C\sum x_k^2 = \sum x_k^2 y_k; \tag{68}$$

$$A\sum x_k^3 + B\sum x_k^2 + C\sum x_k = \sum x_k y_k; \tag{69}$$

$$A\sum x_k^2 + B\sum x_k + nC = \sum y_k, \tag{70}$$

где n — число рассматриваемых точек.

Таким образом, полагая в уравнении (67)

$$y = \frac{в}{M}; \quad x = f\left(\frac{в}{M}\right), \tag{71}$$

найдем кривую

$$\frac{в}{M} = A\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 + B\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right] + C. \tag{72}$$

Для этого необходимо решить систему трех уравнений согласно формулам (68)—(70):

$$A\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^4 + B\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^3 + C\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 = \sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 \frac{в}{M}, \tag{73}$$

$$A\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^3 + B\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 + C\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right] = \sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]\frac{в}{M}; \tag{74}$$

$$A\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 + B\sum\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right] + nC = \sum\frac{в}{M}. \tag{75}$$

Для решений уравнений взяты 10 точек; значения $\frac{в}{M}$ и $f\left(\frac{в}{M}\right)$ приняты по табл. 3. Вычисленные величины

$$\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^4, \quad \left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^3, \quad \left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2, \quad \frac{в}{M}\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2, \quad \frac{в}{M}f\left(\frac{в}{M}\right)$$

даны в табл. 4.

Таблица 4

№ точки	$\frac{в}{M}$	$f\left(\frac{в}{M}\right)$	$\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2$	$\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^4$	$\left[\left(f\frac{в}{M}\right)\right]^3$	$\frac{в}{M}f\left(\frac{в}{M}\right)$	$\frac{в}{M}\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2$
1	0,561	0	0	0	0	0	0
2	0,500	—0,0895	—0,008	—0,000064	— 0,0007	0,045	—0,004
3	0,400	—0,256	—0,066	—0,004	— 0,017	—0,102	—0,026
4	0,300	—0,456	0,208	0,043	— 0,095	—0,136	—0,062
5	0,200	—0,730	0,533	0,284	— 0,389	—0,146	—0,106
6	0,100	—0,175	1,381	1,907	— 1,622	—0,117	—0,138
7	0,080	—1,330	1,769	3,129	— 2,353	—0,106	—0,142
8	0,060	—1,510	2,280	5,198	— 3,443	—0,090	0,137
9	0,040	—1,765	3,115	9,703	— 5,498	—0,071	0,124
10	0,020	—1,220	4,928	24,285	—10,941	—0,044	0,098
Σ	2,26	—9,53	+ 14,29	+ 44,55	—24,36	—0,86	+ 0,84

Примечание. При суммировании проведено округление до второго знака.

Подставляя вычисленные величины из табл. 4 в систему (73)—(75), соответственно получим

$$A = 0{,}169;\ B = 0{,}6;\ C = 0{,}555.$$

Таким образом, искомое уравнение (72) принимает вид

$$\frac{в}{M} = 0{,}169\left[f\left(\frac{в}{M}\right)\right]^2 + 0{,}6f\left(\frac{в}{M}\right) + 0{,}555\right]. \tag{76}$$

Решая это уравнение относительно $f\left(\frac{в}{M}\right)$, найдем

$$f\left(\frac{в}{M}\right) = 0{,}375\sqrt{42{,}2\frac{в}{M} - 1} - 1{,}78. \tag{77}$$

Следовательно, при $\frac{в}{M} < 0{,}561$ приведенный расход

$$q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - \left(0{,}375\sqrt{42{,}2\frac{в}{M} - 1} - 1{,}78\right)}, \tag{78}$$

а в соответствии с формулой (61)

$$q = \frac{kH}{\frac{L}{M} - \left(0{,}375\sqrt{42{,}2\frac{в}{M} - 1} - 1{,}78\right)}. \tag{79}$$

Другое приближенное решение для q при $\frac{в}{M} < 0{,}561$ может быть получено исходя из следующих соображений. Выше, при установлении приближенной формулы для q_r, мы исходили из того, что в выражении $q = kHq_r$ приведенный расход может быть представлен как $q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - f\left(\frac{в}{M}\right)}$, причем $f\left(\frac{в}{M}\right)$ находилось из квадратного уравнения (76). Корень этого уравнения может быть представлен в виде

$$f\left(\frac{в}{M}\right) = \frac{-0{,}6 + \sqrt{0{,}6^2 - 4 \cdot 0{,}169\left(0{,}555 - \frac{в}{M}\right)}}{2 \cdot 0{,}169}. \tag{80}$$

Приближенное выражение корня в правой части (80) приводит окончательно к виду

$$f\left(\frac{в}{M}\right) = 1{,}67\frac{в}{M} - 0{,}93, \tag{81}$$

откуда приближенная формула для q_r приобретает вид

$$q_r = \frac{1}{\frac{L}{M} - \left(1{,}67\frac{в}{M} - 0{,}93\right)}, \tag{82}$$

а в соответствии с формулой (61)

$$q = \frac{kH}{\frac{L}{M} - \left(1{,}67\frac{в}{M} - 0{,}93\right)}. \tag{83}$$

Чтобы установить, насколько отличаются значения q_r, вычисленные по приближенным формулам (78) и (82), от точных, установлен-

ных по формуле (62), следует вычислить q_r по всем трем формулам для одних и тех же значений $\frac{L}{M}$ и $\frac{в}{M}$.

Надо полагать, что следует рассматривать такой диапазон указанных соотношений, который отражал бы возможное многообразие практических случаев притока в горные выработки. Мы рассмотрели следующие значения:

$\frac{L}{M}$: 20,0; 10,0; 5,0; 4,0; 2,5; 2,0; 1,0.

$\frac{в}{M}$: 0,5; 0,3; 0,1; 0,04.

Как видно, формулы (62), (78) и (82) могут быть представлены в общем виде (63) с введением в формулу (52) обозначений

$$f_1\left(\frac{в}{M}\right) = 1{,}47 \lg\left(Sh\frac{\pi}{2} \cdot \frac{в}{M}\right). \tag{84}$$

Численные значения этой функции представлены в табл. 3.

В формуле (78)

$$f_2\left(\frac{в}{M}\right) = 0{,}375 \sqrt{42{,}2\frac{в}{M} - 1} - 1{,}78, \tag{85}$$

в формуле (82)

$$f_3\left(\frac{в}{M}\right) = 1{,}67\frac{в}{M} - 0{,}93. \tag{86}$$

В табл. 5 параллельно представлены значения q_r, вычисленные по формулам (62), (78) и (82).

Таблица 5

$\frac{L}{M}$	q_r при $\frac{в}{M}$ = 0,5				q_r при $\frac{в}{M}$ = 0,3			
	по формулам			опытное	по формулам			опытное
	(62)	(78)	(82)		(62)	(78)	(82)	
20	0,0498	0,0497	0,0498	0,0500	0,0489	0,0468	0,0489	0,04700
10	0,0991	0,0999	0,0990	0,0945	0,0956	0,0952	0,0959	0,0945
5	0,1964	0,1961	0,1962	0,1670	0,1832	0,1818	0,1841	0,1570
4	0,2445	0,2442	0,2442	0,2440	0,2244	0,2222	0,2257	0,2150
2,5	0,3862	0,3844	0,3853	0,3120	0,3416	0,3333	0,3414	0,2930
2,0	0,4785	0,4759	0,4773	0,4350	0,4076	0,4000	0,4116	0,4260

Продолжение табл. 5

$\frac{L}{M}$	q_r при $\frac{в}{M}$ = 0,1				q_r при $\frac{в}{M}$ = 0,04			
	по формулам			опытное	по формулам			опытное
	(62)	(78)	(82)		(62)	(78)	(82)	
20	0,0472	0,0474	0,0482	—	0,0460	0,0466	0,0479	—
10	0,0895	0,0900	0,0929	0,0860	0,0850	0,0872	0,0920	—
5	0,1619	0,1637	0,1735	0,1310	0,1478	0,1545	0,1705	0,1100
4	0,1932	0,1958	0,2099	0,1890	0,1734	0,1828	0,2056	0,1630
2,5	0,2720	0,2772	0,3064	0,3430	0,2344	0,2519	0,2973	0,1820
2,0	0,3149	0,3218	0,3619	0,3570	0,2656	0,2882	0,3492	0,2860

4. Опыты по методу ЭГДА и сравнение теоретических и опытных данных

Для проверки полученных выше теоретических решений q_r определялось методом электрогидродинамических аналогий ЭГДА[1].

Моделируя в масштабе область фильтрации (схема модели представлена на рис. 8) на электропроводящей бумаге, исходят [2, 9] из того, что

$$q_r = I_r, \tag{87}$$

где I_r — приведенная сила тока:

$$I_r = \frac{S}{a} \cdot \frac{R_э}{R_м}; \tag{88}$$

$R_м$ и $R_э$ — омическое сопротивление соответственно модели и так называемого эталона.

Эталон представляет собой прямоугольную полоску из электропроводящей бумаги длиной S и шириной a, причем при определении сопротивления этого эталона контакты измерительного прибора присоединяют к границам эталона, имеющим размер a. Так как материал модели нередко бывает недостаточно однородным, эталон выполнялся из *материала модели*.

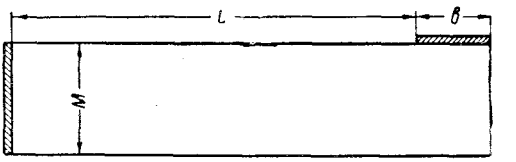


Рис. 8. Схема модели области фильтрации для опытов по методу ЭГДА

Определение q_r указанным методом производилось на моделях из электропроводящей бумаги, изготовленной Красносельской бумажной фабрикой Ленинградского совнархоза. Выполнены две серии опытов.

Первая серия опытов выполнена для условий $\frac{в}{M} > 0{,}561$. При этом q_r определялось при значениях $\frac{L}{M}$: 50; 20; 10; 5. Для каждого из них q_r определялось при значениях $\frac{в}{M}$: 2,0; 1,6; 1,2; 0,8; 0,561. Для этих же условий вычислены величины q_r по уравнению (64). Эти данные для сравнения сведены в табл. 6.

Таблица 6

$\frac{L}{M}$	q_r при $\frac{в}{M}$ = 2,0		1,6		1,2		0,8		0,561	
	по формуле (64)	опытное	по формуле (64)	опытное	по формуле (64)	опытное	по формуле (64)	опытное	по формуле (64)	опытное
50	0,0206	0,0200	0,0204	0,0200	0,0202	0,0180	0,0201	0,0180	0,0200	0,0180
20	0,0544	0,0500	0,0531	0,0500	0,0518	0,0500	0,0505	0,0500	0,0500	0,0500
10	0,1196	0,0950	0,1134	0,0940	0,1078	0,0940	0,1027	0,0930	0,1000	0,0920
5	0,2980	0,3730	0,2610	0,3110	0,2340	0,2990	0,2110	0,2780	0,2000	0,2610

Вторая серия опытов выполнена для условий $\frac{в}{M} < 0{,}561$; при этом q_r определялось при значениях $\frac{L}{M}$: 20; 10; 5; 4; 2,5; 2. Для каждого

[1] Эта работа была проведена в Гидрогеологической лаборатории Ленинградского горного института Б. П. Остроумовым.

из этих значений q_r определялось при значениях $\frac{в}{M}$: 0,5; 0,3; 0,1; 0,04. Для этих же условий вычислены величины q_r по формулам (78) и (82). Данные для сравнения сведены в табл. 5.

5. Анализ полученных решений и примеры расчета

Разработанные выше приближенные формулы сравнивались с упомянутым точным решением, а также со специально поставленными опытами по методу ЭГДА. Это исследование показало, что следует различать два случая.

Первый случай: $\frac{в}{M}>0{,}561$. Для этого случая применимы формулы (64) и (58).

Сравнение q_r, вычисленного по формуле (64), с опытными данными (см. табл. 6) показывает, что при $\frac{L}{M}=10$ расхождение между этими величинами, по-видимому, составляет примерно 10%. При бóльших значениях $\frac{L}{M}$ это расхождение уменьшается. При меньших значениях $\frac{L}{M}$, достигающих 5, в отдельных случаях это расхождение увеличивается. Однако для рассмотренных пределов $0{,}561<\frac{в}{M}<2$ случаи устройства горных выработок при $\frac{L}{M}<5$ на практике встречаются весьма редко.

Для условий же $\frac{L}{M}>20$ роль $\frac{в}{M}$ весьма мала и для соотношений $0{,}561<\frac{в}{M}<2$ можно принять формулы (65) и (66).

Второй случай: $\frac{b}{M}<0{,}561$. Для этого случая решение определяется формулой (78) и (79).

Менее точной, упрощенной является формула (82) и соответственно (83).

Параллельное рассмотрение значений q_r, вычисленных по формулам (78) и (82), показывает (см. табл. 5), что при $\frac{в}{M}>0{,}04$ расхождение между численными значениями ничтожно мало, и при определении q практически безразлично, какой из формул — (79) или (83) — надлежит пользоваться. Для малых значений $\frac{в}{M}$, во всяком случае для $\frac{в}{M}\leqslant 0{,}04$, можно рекомендовать формулу (78) и соответственно (79).

Сравнение величин q_r, вычисленных по формулам (78) и (82), с величинами, полученными опытным путем (см. табл. 5), показывает, что чем больше $\frac{L}{M}$, тем при прочих равных условиях расхождения между теоретическими и опытными данными меньше.

Следует обратить внимание, что теоретические значения q_r, вычисленные по формулам (78) и (82), несколько преувеличены по сравнению с опытными. Следовательно, пользование формулами (79) и (83) предусматривает некоторый запас в определении фильтрационного притока.

Упомянем, что при *малых* значениях $\frac{в}{M}$ (например, при $\frac{в}{M} = 0{,}04$ и $\frac{L}{M} = 4$) (см. табл. 5) наблюдается значительное расхождение (до 25% и выше) величин q_r, установленных по формулам (78) и (82) и опытами — методом ЭГДА. Надо полагать, что это расхождение объясняется чисто техническими причинами и невозможностью точно определить q_r опытным путем в связи со значительными электрическими сопротивлениями соответствующих моделей.

Использование прилагаемых формул поясним примерами.

Пример 6. Пусть приток в горную открытую выработку *I* происходит по схеме, представленной на рис. 9, в породах, где $k = 2$ *м/сутки*. Питание водоносного горизонта мощностью 4 *м* осуществляется при $H = 5$ *м*, $L = 60$ *м*, причем приток в выработку, полу-

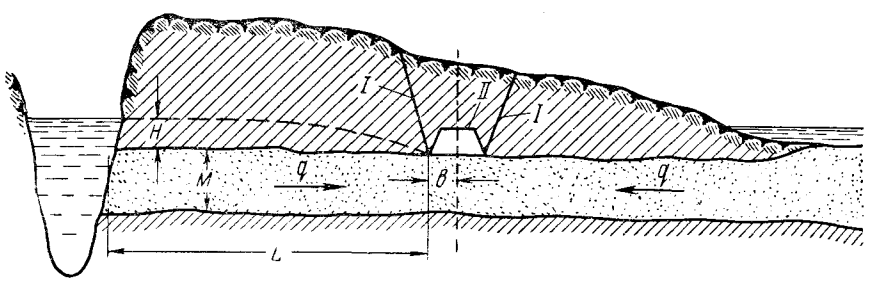


Рис. 9. Иллюстрация к примерам 6 и 7

ширина которой $в = 6$ *м*, происходит симметрично с обеих сторон, так что единичный двусторонний приток

$$q_0 = 2q, \tag{89}$$

где q — односторонний приток.

Поскольку $\frac{в}{M} = \frac{6{,}0}{4{,}0} = 1{,}5$, то применимы зависимости (58) и (64). Подставляя в формулу (58) все данные, получаем

$$q = \frac{2{,}5}{\frac{60}{4} - 1{,}14 \cdot 1{,}5 + 0{,}64} = \frac{10}{13{,}93} = 0{,}72 \text{ } м^2/сутки.$$

Следовательно, по формуле (89)

$$q_0 = 2 \cdot 0{,}72 = 1{,}44 \text{ } м^2/сутки.$$

По формуле (66)

$$q = \frac{10}{\frac{60}{4} - 0{,}82} = \frac{10}{14{,}08} = 0{,}71 \text{ } м^2/сутки.$$

Следовательно, по формуле (89)

$$q_0 = 2 \cdot 0{,}71 = 1{,}42 \text{ } м^2/сутки.$$

Пример 7. Приток в горную подземную выработку *II* иллюстрируется тем же рис. 9. При этом полуширина выработки *II* определяется $в = 2$ *м*; $M = 20$ *м*; $H = 5$ *м*; $k = 2$ *м/сутки*; расстояние до области питания в обе стороны от выработки может быть принято равным 120 *м*.

Поскольку $\frac{в}{M} = \frac{2}{20} = 0{,}1$, то применимы зависимости (79) или (83).

Подставив все данные в формулу (79), получим

$$q = \frac{2{,}5}{\frac{120}{20} - (0{,}375 \cdot 42{,}2 \cdot 0{,}1 - 1 - 1{,}78)} = \frac{10}{6{,}57} = 1{,}52 \ м^2/сутки.$$

Следовательно, по формуле (89) двусторонний приток

$$q_0 = 2 \cdot 1{,}52 = 3{,}04 \ м^2/сутки.$$

По зависимости (83)

$$q = \frac{2{,}5}{\frac{120}{20} - (1{,}67 \cdot 0{,}1 - 0{,}93)} = \frac{10}{6{,}763} = 1{,}48 \ м^2/сутки.$$

Следовательно, по формуле (89)

$$q_0 = 2 \cdot 1{,}48 = 2{,}96 \ м^2/сутки.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дальнейшем работы по определению водопритоков в несовершенные горные выработки целесообразно ориентировать по следующим направлениям:

1. Для выработок, где приток происходит в условиях безнапорного движения, прежде всего следует уточнить пределы, при которых предлагаемые формулы могут дать приемлемую для практики точность определяемых величин. Затем рассмотреть приближенные решения для тех случаев, когда несовершенная горная выработка эксплуатируется в мощном водоносном горизонте. Предварительные соображения свидетельствуют о необходимости выяснения качественной и количественной характеристики активной зоны. Необходимо найти решение для случаев, когда водоносный горизонт сложен неоднородными по водопроницаемости породами. Наконец, надлежит обратить внимание на ширину зоны влияния выработки L. Если для аналогичной величины(в условиях радиального движения подземных вод) радиуса влияния имеются в настоящее время достаточно надежные рекомендации [4], то для условий плоского движения таких рекомендаций еще нет.

2. Для выработок, где приток происходит в условиях напорного движения, по-видимому, следует разработать предложения, которые учитывали бы более сложную гидрогеологическую обстановку: одностороннее питание водоносного горизонта, двусторонний несимметричный приток к выработке, приток в условиях многослойных пород и т. п. Весьма существенен вопрос о ширине зоны влияния L. Эта гидрогеологическая характеристика нуждается в теоретическом и экспериментальном изучении.

В дальнейшем следует обратиться не только к выработкам достаточно длинным, приток к которым рассматривается в условиях плоской задачи (как выполнено выше), но и к коротким выработкам, приток к торцам которых может существенно исказить плоскую задачу.

3. Полученные в настоящей работе решения могут быть применены при проектировании как открытых, так и подземных горных выработок, когда определение притока в выработку служит основанием для установления водоотливных средств или разработки мероприятий по снижению пьезометрического напора, а следовательно, и уменьшению водопритока.

Весьма желательно сравнение результатов подсчетов по предлагаемым формулам с действительными натурными наблюдениями за водопритоками в несовершенные горные выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Изд. II. Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1955.
2. Дружинин Н. И. Метод электро-гидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. Госэнергоиздат, 1956.
3. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.
4. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. Углетехиздат, 1955.
5. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях. Изд. VI. Гостехиздат, 1954.
6. Нумеров С. Н. Новый метод решения фильтрационных задач при отсутствии промежутка высачивания, инфильтрации или испарения воды со свободной поверхности. «Прикладная математика и механика», 1942, т. VI, вып. 1.
7. Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты горизонтального дренажа гидростанций и промышленных сооружений (при конечной глубине водопроницаемого слоя). Изв. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 1947, т. XXXIV.
8. Павловский Н. Н. Гидромеханический расчет плотин системы Сенкова. ОНТИ, 1937.
9. Павловский Н. Н. Теория движения грунтовых вод и ее основные приложения. Соч., т. II. Изд-во АН СССР, 1956.
10. Плотников Н. И., Сыроватко М. В., Щеголев Д. И. Подземные воды рудных месторождений. Металлургиздат, 1957.
11. Сегал Б. И., Семендяев К. А. Пятизначные математические таблицы. Изд-во АН СССР, 1560.
12. Сыроватко М. В. Методика расчета притоков подземных вод к горным выработкам. Тр. геол.-развед. треста Средазуглеразведка, 1950, вып. 1.
13. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Расчеты фильтрации под гидротехническими сооружениями. Стройиздат, 1941.
14. Успенский А. К. Выбор вида и нахождение параметров эмпирической формулы. Изд. Моск. гос. экон. ин-та, 1960.
15. Яковлев К. П. Математическая обработка результатов наблюдений. Гостехтеоретиздат, 1950.