Записки Ленинградского ордена Ленина и Трудового Красного Знамени горного института
том XXIX, вып. 2, 1953 г

О ПРИТОКЕ В КОТЛОВАН, ОГРАНИЧЕННЫЙ ПЕРЕМЫЧКОЙ СО ШПУНТОМ

Доц. В. И. ДАВИДОВИЧ

В нашей работе «Приток воды в котлован, ограниченный перемычкой» [3], рассматривался случай, когда подпорный горизонт поддерживается водонепроницаемой перемычкой, основание которой плоское, горизонтальное. В этих условиях при притоке в ограниченный перемычкой котлован, откосы которого наклонены к горизонту под углом φ, определялись наиболее существенные при составлении проекта производства и организации работ по устройству котлована величины: фильтрационный приток и точка выхода кривой депрессии на откос котлована.

В практике гидротехнического строительства для уменьшения величины фильтрационного притока в котлован нередко применяются перемычки, неотъемлемой частью которых является шпунт (рис. 1). Этот случай характеризуется следующими условиями движения воды под перемычкой.

При обтекании подошвы перемычки и шпунта за последним устанавливается горизонт грунтовых вод на отметке, меньшей, нежели поверхность земли, так, что $H_1 > H_0$, где H_0 — глубина воды в бьефе перед перемычкой. За шпунтом происходит медленно изменяющееся неравномерное безнапорное движение, причем кривая депрессии выходит на откос котлована в точке M. Высачивание воды в котлован происходит по откосу, в пределах между точкой M и его основанием.

При этом предполагается, что водоносный слой, мощность которого T, характеризуется коэффициентом фильтрации κ. Подстилающие породы — практически водонепроницаемые, так что учитывается лишь приток через откос котлована.

Разделим весь грунтовый поток (рис. 1) на три зоны (фрагмента) вертикалями *1—1* и *2—2*. При этом образуются три фрагмента, обозначенных соответственно цифрами *I, II* и *III*: первый в пределах между линией дна перед перемычкой и вертикалью *1—1*, проходящей через шпунт; второй в пределах между вертикалями *1—1* и *2—2*, причем *2—2* проходит через точку M; третий в пределах между вертикалью *2—2* и подошвой откоса котлована.

Обозначим падение кривой депрессии в пределах между шпунтом и местом выхода ее на откос котлована через H_2, расстояние между вертикалями *1—1* и *2—2* через l_2. Обозначая угол наклона откоса котлована к горизонту через φ, заметим, что коэффициент откоса котлована $m = \operatorname{ctg} \varphi$; высота выхода кривой депрессии на откос котлована над его дном H_3, горизонтальная проекция откоса котлована в пределах третьего

фрагмента l_3. Наконец, обозначим полную потерю напора через H, причем

$$H = H_1 + H_2 + H_3. \tag{1}$$

Вместе с тем

$$H = H_0 + T, \tag{2}$$

где H_0 — глубина воды перед перемычкой;
T — мощность водоносного слоя.

Укажем также, что размеры перемычки, т. е. ширина основания b и глубина забивки шпунта s бывают обычно известны, равно как и упомянутые выше величины H_0 и T. Известно, кроме того, местоположение перемычки, т. е.

$$L = l_2 + l_3, \tag{3}$$

и коэффициент фильтрации грунта основания k.

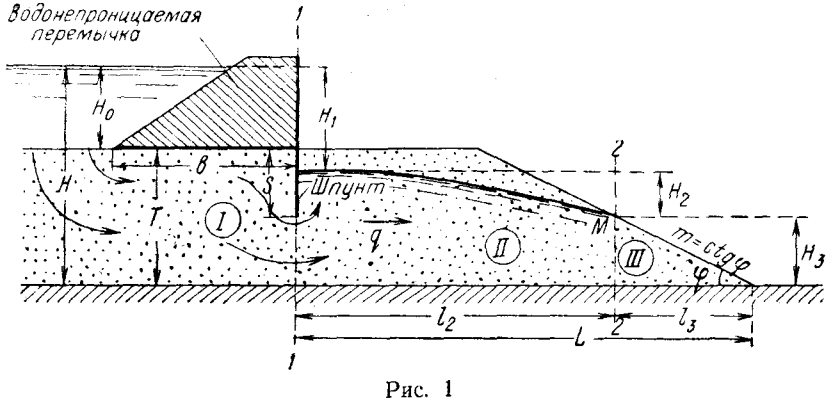


Рис. 1

Подлежат выяснению: во-первых, фильтрационный приток Q и, во-вторых, величины H_1, H_2, H_3. При этом

$$Q = qB, \tag{4}$$

где q — приток на единицу длины перемычки;
B — длина перемычки (в направлении, перпендикулярном к плоскости рис. 1).

В первом фрагменте фильтрационный расход на единицу длины q может быть установлен следующим образом [1]:

$$q = kH_1 q_r, \tag{5}$$

где q_r — приведенный расход, определяется как

$$q_r = \frac{K'}{K}. \tag{6}$$

При этом K и K' — полные эллиптические интегралы первого рода при основном модуле

$$\lambda = \sin\Theta = \sqrt{1 - \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{T}\right)}{\mathrm{ch}^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{b}{T}\right)}} \tag{7}$$

или дополнительном модуле

$$\lambda' = \cos\Theta = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{T}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi}{2}\frac{b}{T}\right)}. \tag{8}$$

Таким образом, величина приведенного фильтрационного расхода q_r, а следовательно, и q — представляет собой некоторую функцию от величин b, s и T.

Во втором фрагменте происходит неравномерное движение при горизонтальном водоупоре на протяжении длины l_2, причем начальная глубина грунтового потока, как видно из рис. 1, будет $H_2 + H_3$, конечная (в сечении *2—2*) — H_3. Таким образом, в пределах второго фрагмента фильтрационный расход q может быть выражен так:

$$q = k\frac{(H_2 + H_3)^2 - H_3^2}{2l_2}. \tag{9}$$

Учитывая, что

$$l_2 = L - mH_3, \tag{10}$$

вместо выражения (9) получим

$$q = k\frac{(H_2 + H_3)^2 - H_3^2}{2(L - mH_3)}. \tag{11}$$

В пределах третьего фрагмента, горизонтальный размер которого l_3, пользуясь известным предложением Н. Н. Павловского и рассматривая фильтрацию в этой зоне подобно фильтрации в низовом клине земляных плотин [4], можем написать

$$q = \frac{k}{m}H_3. \tag{12}$$

Уравнения (1), (5), (11) и (12) содержат четыре искомых неизвестных величины: H_1, H_2, H_3 и q.

Решая (11) и (12) совместно и отбрасывая отрицательное значение корня, получим

$$H_2 = \sqrt{2\frac{q}{k}L - \frac{q^2}{k^2}m^2} - \frac{q}{k}m. \tag{13}$$

Из формулы (5) следует, что

$$H_1 = \frac{q}{k}\frac{1}{q_r}. \tag{14}$$

Величина, обратная приведенному расходу, названа Н. Н. Павловским [1] «модулем формы фрагмента»

$$\frac{1}{q_r} = \Phi. \tag{15}$$

Следовательно,

$$H_1 = \Phi\frac{q}{k} \tag{16}$$

и, очевидно,

$$\Phi = f\left(\frac{b}{T}, \frac{s}{T}\right),$$

Подставляя значения H_1, H_2, H_3 соответственно из формул (16), (13) и (12) в выражение полной потери напора, по выражению (1), после преобразования получим

$$H = \Phi \frac{q}{k} + \sqrt{2 \frac{q}{k} L - \frac{q^2}{k^2} m^2}. \qquad (17)$$

Решая это уравнение относительно q, найдем

$$q = k \frac{\Phi H + L - \sqrt{2\Phi HL + L^2 - m^2 H^2}}{\Phi^2 + m^2}. \qquad (18)$$

Как видно, в правой части выражения (18) все величины известны. Модуль формы фрагмента Φ может быть вычислен аналитически, как

$$\Phi = \frac{K}{K'}, \qquad (19)$$

при модуле эллиптических интегралов λ и λ', определяемых по формулам (7) и (8).

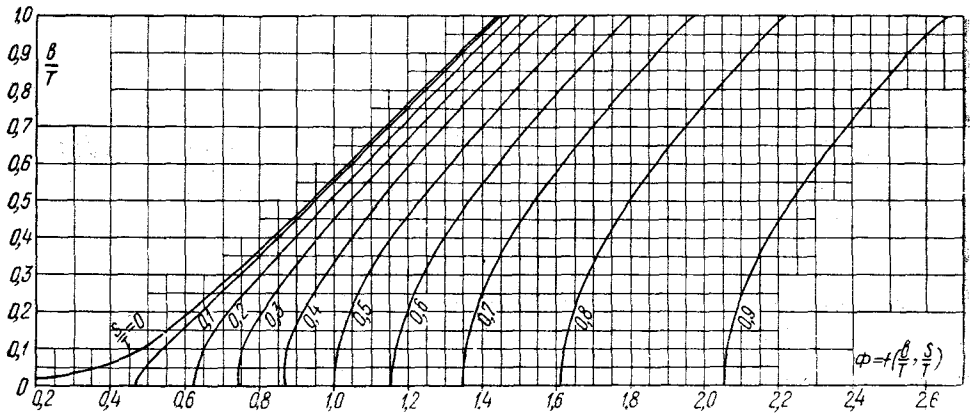


Рис. 2

Для облегчения вычислений нами составлена таблица значений $\Phi = f\left(\frac{b}{T}, \frac{s}{T}\right)$, а также график модуля формы Φ (рис. 2).

Значения модуля формы фрагмента $\Phi = f\left(\frac{b}{T}, \frac{s}{T}\right)$

$\frac{b}{T}$	s/T										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0	0,472	0,620	0,741	0,865	1,000	1,156	1,350	1,614	2,053	∞
0,1	0,483	0,543	0,649	0,759	0,872	1,011	1,165	1,357	1,621	2,066	∞
0,2	0,617	0,647	0,716	0,812	0,918	1,044	1,195	1,383	1,645	2,083	∞
0,3	0,728	0,748	0,800	0,883	0,977	1,095	1,239	1,427	1,683	2,122	∞
0,4	0,837	0,848	0,894	0,959	1,047	1,156	1,299	1,479	1,733	2,176	∞
0,5	0,938	0,951	0,987	1,047	1,125	1,233	1,366	1,546	1,800	2,236	∞
0,6	1,038	1,049	1,083	1,134	1,202	1,314	1,441	1,621	1,876	2,318	∞
0,7	1,140	1,150	1,179	1,228	1,302	1,401	1,524	1,698	1,951	2,374	∞
0,8	1,244	1,250	1,279	1,324	1,397	1,488	1,616	1,786	2,032	2,481	∞
0,9	1,341	1,350	1,374	1,422	1,488	1,585	1,704	1,876	2,123	2,551	∞
1,0	1,443	1,450	1,475	1,520	1,585	1,678	1,800	1,972	2,217	2,663	∞

Зная фильтрационный расход q по (18), значения напоров H_1 и H_3, теряемых соответственно в первом и третьем фрагментах, можно определить по (16) и (12).

Величину H_2 удобно находить из выражения (1).

В том случае, когда конструкция перемычки предусматривает устройство шпунтового заграждения перед перемычкой, как то показано, например, на рис. 3, метод расчета остается тем же и определение величин q, H_1, H_2, H_3 производится по тем же формулам, как и в предыдущем случае. Однако модуль формулы фрагмента Ф находится по (19) при другом значении модуля λ эллиптических интегралов:

$$\lambda = \sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{s}{T}\right). \qquad (20)$$

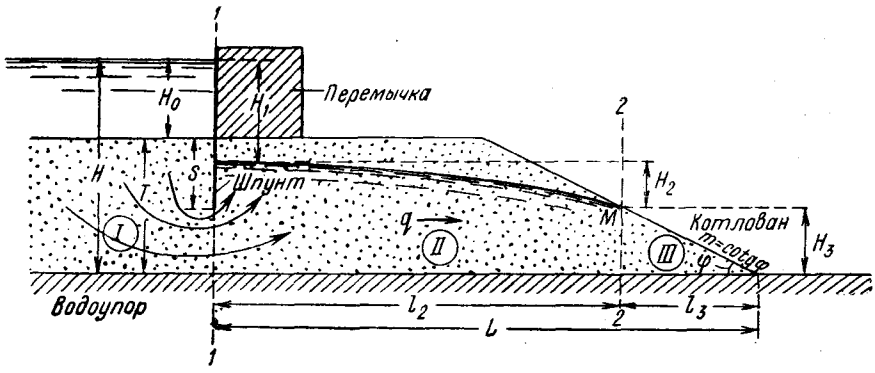


Рис. 3

Заметим, что модуль формы фрагмента Ф в этом случае может быть также найден по графикам рис. 2. Очевидно, в этом случае численные значения Ф лежат на оси абсцисс, при $\frac{b}{T}=0$ и соответствующем значении $\frac{s}{T}$.

Покажем на некоторых примерах порядок расчета притока в котлован по приведенным выше формулам.

Пример 1. Требуется определить возможный приток в котлован под перемычкой, длина которой $B = 240$ *м*. С верховой стороны перемычка ограничена (рис. 3) шпунтом, забитым на глубину $s = 5$ *м* в аллювиальные отложения, представленные песками, коэффициент фильтрации которых $k = 2{,}65$ *м/сутки*. Мощность аллювиальных отложений $T = 6$ *м*. Подстилающие породы практически водонепроницаемы. Котлован характеризуется откосом, заложенным под углом $\varphi = 26°30'$, чему соответствует коэффициент откоса $m = \operatorname{ctg}\varphi = 2$.

Расстояние от шпунта до подошвы откоса $L = 18$ *м*. Перемычка поддерживает горизонт воды при уровне $H_0 = 2$ *м* над линией дна. Таким образом, $H = H_0 + T = 8$ *м*.

Прежде всего определим модуль формы первого фрагмента, для чего находим $\frac{s}{T}=\frac{5}{6}=0{,}835$. Этому значению на графике рис. 2 соответствует $\Phi = 1{,}75$ (при $\frac{b}{T}=0$ на оси абсцисс). По формуле (18) удобно найти отношение

$$\frac{q}{k}=\frac{1{,}75\times 8{,}0+18{,}0-\sqrt{2\times 1{,}75\times 8{,}0\times 18{,}0+324{,}0-4\times 64{,}0}}{3{,}05+4{,}0}=1{,}15.$$

Следовательно,

$$q = 1{,}15k = 1{,}15 \times 2{,}65 = 3{,}05 \ м^2/сутки.$$

Приток по всему фронту перемычки на длине $B = 240$ *м* будет

$$Q = 240 \times 3{,}05 \simeq 795 \ м^3/сутки \simeq 33{,}0 \ м^3/час.$$

Для определения местоположения кривой депрессии поступаем следующим образом.

По (16) находим

$$H_1 = \frac{q}{k}\Phi = 1{,}15 \times 1{,}75 = 2{,}01 \ м.$$

По формуле (12)

$$H_3 = \frac{q}{k}m = 1{,}15 \times 2{,}0 = 2{,}30 \ м.$$

Исходя из выражения (1),

$$H_2 = H - H_1 - H_3 = 8{,}0 - 2{,}01 - 2{,}30 = 3{,}69 \ м.$$

Как видно, глубина подземного потока непосредственно за шпунтом определится как $H_3 + H_2 = 2{,}30 + 3{,}69 = 5{,}99$ *м*. Следовательно, непосредственно за шпунтом горизонт поднимается до дневной поверхности. Это указывает на возможность выхода воды за перемычкой при применении шпунта меньшей глубины.

Пример 2. Перемычка трапецоидального очертания, отсыпанная из суглинка, с низовой стороны ограничена шпунтом (рис. 1), глубина забивки которого в аллювиальные отложения $s = 7$ *м*, ширина перемычки по подошве $b = 5{,}8$ *м*. Аллювиальные отложения, в которых расположен котлован, характеризуются коэффициентом фильтрации $k = 3{,}5$ *м/сутки*.

Определить: 1) приток в котлован на протяжении 1 *м*, т. е. $B = 1$; 2) положение кривой депрессии, если мощность водоносного слоя $T = 10$ *м*, откос котлована — тройной, т. е. $m = \operatorname{ctg}\varphi = 3$ и расстояние от шпунта до подошвы откоса котлована $L = 40$ *м*. Глубина воды перед перемычкой $H_0 = 2$ *м*, следовательно, $H = 2 + 10 = 12$ *м*.

Для определения модуля формы первого фрагмента находим

$$\frac{s}{T} = \frac{7}{10} = 0{,}7; \quad \frac{b}{T} = \frac{5{,}8}{10} = 0{,}58.$$

Этим значениям на графике рис. 3 соответствует $\Phi = 1{,}6$.

По формуле (18) определяем

$$\frac{q}{k} = \frac{1{,}6 \times 12 + 40 - 2 \times 1{,}6 \times 40 + 1600 - 9 \times 144}{2{,}56 + 9} = 1{,}42.$$

Следовательно,

$$q = 1{,}42k = 1{,}42 \times 3{,}5 = 4{,}96 \ м^2/сутки;$$

$$H_1 = \frac{q}{k}\Phi = 1{,}42 \times 1{,}6 = 2{,}27 \ м;$$

$$H_3 = \frac{q}{k}m = 1{,}42 \times 3{,}0 = 4{,}26 \ м;$$

$$H_2 = H - H_1 - H_3 = 12{,}0 - 2{,}27 - 4{,}26 = 5{,}47 \ м.$$

Глубина подземного потока за шпунтом

$$H_3 + H_2 = 4{,}26 + 5{,}47 = 9{,}73$$

Настоящий метод определения притока в котлованы был применен при проектировании производства и организации работ строящейся гидроэлектрической станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский Н. Н. Гидромеханический расчет плотин системы Сенкова. ОНТИ, 1937.

2. Аравин В. И. и Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Стройиздат, 1948.

3. Давидович В. И. Приток воды в котлован, ограниченный перемычкой. Записки Ленинградского горного института, т. XXVII, вып. II, 1952.

4. Давидович В. И. Приближенный метод определения притока напорных вод в котлованы сооружений и открытые горные выработки. Записки Ленинградского горного института, т. XXVI, вып. II, 1952.

5. Сегал Б. И. и Семендяев К. А. Пятизначные математические таблицы. Изд АН СССР, 1950.

Поступило 12/XI-1952 г.