

ГИДРОТЕХНИКА

А. М. Мхитарян

**Фильтрация воды через земляные плотины на
 проницаемых основаниях с наклонным
 водоупором**

Фильтрация в земляных плотинах может иметь те или иные особенности, в зависимости от конструкции плотины, характера основания, наличия или отсутствия воды в нижнем бьефе и т. д.

Для выявления закономерностей этого движения прежде всего дадим, насколько это возможно, точное решение основной простейшей задачи фильтрации воды через однородную трапециoidalную плотину на проницаемом основании, с наклонным водоупором, обладающим тем же коэффициентом фильтрации, что и плотина. Эта задача применительно к плотинам на водоупоре была положена в основу фильтрационных исследований рядом авторов: Павловский [1], Угинчус [2], Дахлер) и решена с большей или меньшей степенью точности.

Для плотин на водопроницаемом основании с горизонтальным водоупором задача была впервые решена автором настоящей статьи в 1944 г. в своей кандидатской диссертации [3], а затем П. А. Шанкиным [4] в 1947 г., в несколько иной форме.

Однако расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях с наклонным водоупором решается впервые. Этот случай является наиболее общим и часто встречающимся в практике. Из этого решения можно получить многочисленные частные случаи, использование которых потребует при решении более сложных задач на фильтрацию через неоднородные плотины (имеющие противифльтрационные устройства, неоднородность грунта тела, плотины и основания и т. п.

Автор имеет целью сопоставить данное решение с гидромеханическим решением этого же случая, разработанным самим автором под руководством члена-корреспондента АН СССР П. Я. Полубариновой-Кочиной. Оно позволит нам дать оценку точности: во-первых, данного решения, во-вторых, различных приближенных способов решения, полученных другими авторами.

Мы ограничились решением фильтрации через земляные плотины при отсутствии воды в нижнем бьефе, т. к., во-первых, для наших целей интересен именно этот случай, при котором роль проницаемого основания наиболее значительна, а при устройстве ядра или

экрана происходит поглощение фильтрационных вод в толще основания, в то время как наличие воды в нижнем бьефе ограничивает снижение выходной ординаты и тем самым существенно приближает явление к фильтрации через земляные плотины на водоупоре. Во-вторых, отсутствие воды в нижнем бьефе при плотинах на проницаемом основании с наклонным водоупором более типично, чем при плотинах на водоупоре или с горизонтальным проницаемым основанием небольшой мощности.

Мы дадим решение задачи для случая земляной плотины трапециoidalного профиля при наклонном водоупоре, имеющем направление в сторону падения реки.

Пусть напор плотины будет H , высота плотины $H_{пл}$, высота точки O пересечения раздельного сечения с верховым откосом H_0 , откосы плотины m и m_1 , ширина по низу $L_{пл}$, толщина проницаемого слоя в створе I—I—Т. Разделим плотину на 3 части сечениями I—I и II—II (чертеж 1). Получим верховой клин, среднюю часть плотины и низовой клин. Проведем раздельное сечение I—I с таким расчетом, чтобы отделить крайние зоны с криволинейными очертаниями линии токов от зоны с примерно прямолинейными траекториями движения. Для этой цели используем имеющийся материал наиболее совершенных по постановке экспериментов (данные Скабаллановича, Павловского и автора). Что касается второго раздельного сечения II—II, определяющего низовой клин, то вполне удовлетворительные результаты дает его положение в створе выходной ординаты кривой депрессии.

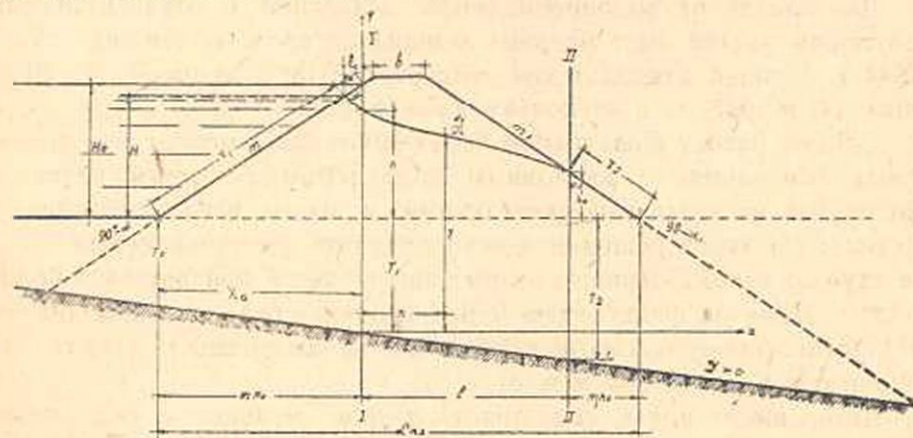


Рис. 1.

Заметим, что линии токов в пределах верхового клина имеют во всех случаях ясно выраженные вогнутые очертания и могут, поэтому, рассматриваться как дуги более или менее концентрических окружностей или эллипсов.

В пределах низового клина расположение линий тока в верхней части несколько иное. В самом деле, при отсутствии ...

нем бьефе низовой откос, подобно верховому, не представляет из себя эквипотенциальной поверхности. Линией равного напора в нижнем бьефе служит горизонтальная поверхность земли. Поэтому линии токов в непосредственной близости от подножия сухого откоса направлены вверх, но в точке выклинивания кривая депрессии, как известно, тангенциальна к сухому откосу и имеет, поэтому, чуть выпуклые (со впадом вниз) очертания. Следовательно, в пределах смежной части низового откоса направление выклинивающихся линий тока должно изменяться от тангенциального (в верхней точке клина) через нормальное к откосу где-то на его поверхности, к вертикальному у подошвы откоса. Выпуклые очертания линий токов могут иметь место только в самой верхней части низового клина.

Таким образом, приближенно можно принять линии токов и в пределах низового клина за дуги концентрических окружностей или эллипсов) с центром в точке O' .

Если в самой верхней части низового клина (у точки O') истинное направление линий токов и будет несколько отличаться от принятого нами, то для гидравлической задачи это не должно иметь практического значения.

Посмотрим теперь, нельзя ли обусловить положение раздельного сечения I—I каким-либо количественным соотношением.

В таблице 1 приводятся данные, характеризующие положение раздельного сечения для 20 изученных моделей (из которых в 6 моделях работы были выполнены как в лотке, так и методом ЭГДА, при тех же или несколько измененных размерах).

Просматривая эту таблицу, легко обнаружить, что в отличие от отношения a_1 , не обнаруживающего достаточного постоянства, величина $a \frac{H_0}{H}$ оказывается почти постоянной для всех опытов, не

смотря на большие различия в размерах, характере моделей и методике опытов. Если при определении ограничиться одним знаком после запятой, то величина этого отношения примет постоянное значение $a=1,1$. Допущение $a=1,1$, как показывает таблица, дает погрешность не более нескольких процентов.

При $a=1,1$ расстояние раздельного сечения I—I от уреза воды на верховом откосе I, будет равно:

$$l_1 = m(H_0 - H) = m(1,1H - H) = 0,1mH \quad (1)$$

(см. черт. 1).

Расчет верхового клина плотины

Для получения расчетных уравнений для всех трёх частей плотины необходимо определить гидравлический градиент в каждой части плотины, затем определить скорость и расход.

Гидравлический градиент равен потери напора, деленной на-

длину пути фильтрации. Общая потеря напора в верховом клине есть $H-h$.

Если живое сечение I—I плоское, то эту потерю напора будет иметь каждая струйка в верхнем клине.

Рассмотрим 2 случая:

I $h + T_1 \leq r_1$ и II $h + T_1 > r_1$ (см. черт. 2а),

I-й случай: $h + T_1 \leq r_1$ или $h + T_1 \leq \frac{H}{\cos \alpha}$

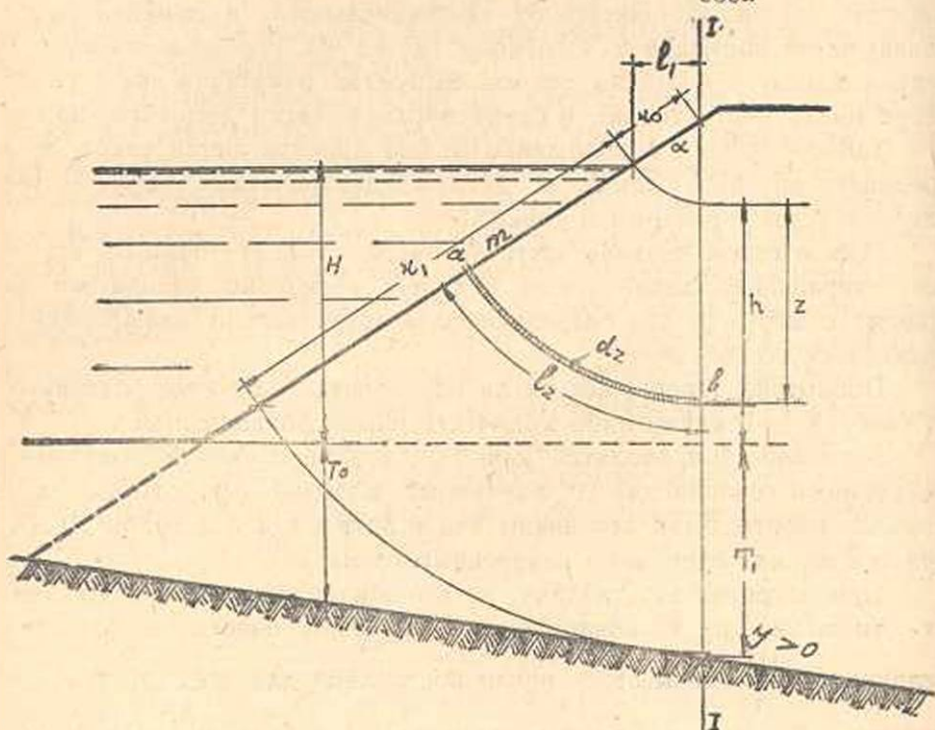


Рис. 2 а

Возьмем элементарную струйку $ab=l_z$, толщиной d_z , проходящую между откосами и раздельным сечением на глубину z .

Если приближенно принять траекторию струй за дуги concentрических окружностей с центром в верхней точке раздельного сечения 0, то длина струйки l_z определяется следующим образом:

$$l_z = 2\pi(r_0 + z) \frac{\alpha}{360}, \quad (2)$$

где α есть угол верхового откоса.

Как уже мы отметили, линии токов несколько длиннее дуг окружностей. Поэтому уточненное выражение длины струй следует написать так:

$$l_z = 2\pi\beta_1(r_0 + z) \frac{\alpha}{360}, \quad (3)$$

где β_1 — поправочный коэффициент — больше единицы. Поскольку верх-

ние струи почти полностью соответствуют дугам окружностей и для них $\beta_1=1$, то этот коэффициент зависит от радиуса.

Эмпирически можно принять: $\beta_1 = a(r_0 + z)^{\mu}$, (4)

где a и μ — численные параметры, определение которых на опыте облегчается тем условием, что поверхностная струйка имеет $\beta_1=1$, т. е. при $z=0$.

$$a r_0^{\mu} = 1. \quad (5)$$

Ввиду того, что опытный материал полностью не обработан для определения численных значений этих параметров, пока примем значение $\beta_1=1$. Гидравлический градиент элементарной струйки будет:

$$J = \frac{H-h}{l_z} = \frac{H-h}{2\pi(r_0+z)^{\frac{\alpha}{360}}} = \frac{H-h}{\delta_1(r_0+z)},$$

где: $\delta_1 = 2\pi \frac{\alpha}{360}$.

Величина δ_1 будет представлять собой ни что иное, как угол α , выраженный в радианах.

Скорость по закону Дарси равна:

$$V = KJ = K \frac{H-h}{\delta_1(r_0+z)};$$

Элементарный расход равен:

$$dq = V \cdot dz = \frac{K(H-h)}{\delta_1(r_0+z)} dz.$$

Интегрируя в пределах от 0 до $h+T_1$, получим.

$$Q = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \int_0^{h+T_1} \frac{dz}{r_0+z} = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \left[\ln(r_0+h+T_1) - \ln r_0 \right];$$

подставляя сюда значения:

$$r_0 = H_0 - h = 1,1H - h, \quad T_1 = T_0 - JX_0$$

$$\text{и } X_0 = mH_0 = 1,1mH,$$

получим:

$$Q = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \ln \frac{1,1H + T_0 - 1,1mH}{1,1H - h} \quad (6)$$

II-й случай.

$$h + T_1 > r_1 \text{ или } h + T_1 > \frac{H}{\cos \alpha} \quad (\text{см. черт. 2 б}).$$

Проводя радиусом r_1 дугу из центра O через точку E , разобьем фильтрационный поток на две зоны. Обозначим расход, проходящий в первой зоне через q_1 , а расход во второй зоне — через q_2 .

По предыдущему, расход любой элементарной струйки, расположенной в пределах I зоны, будет:

$$dq_1 = V \cdot dz = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \cdot dz$$

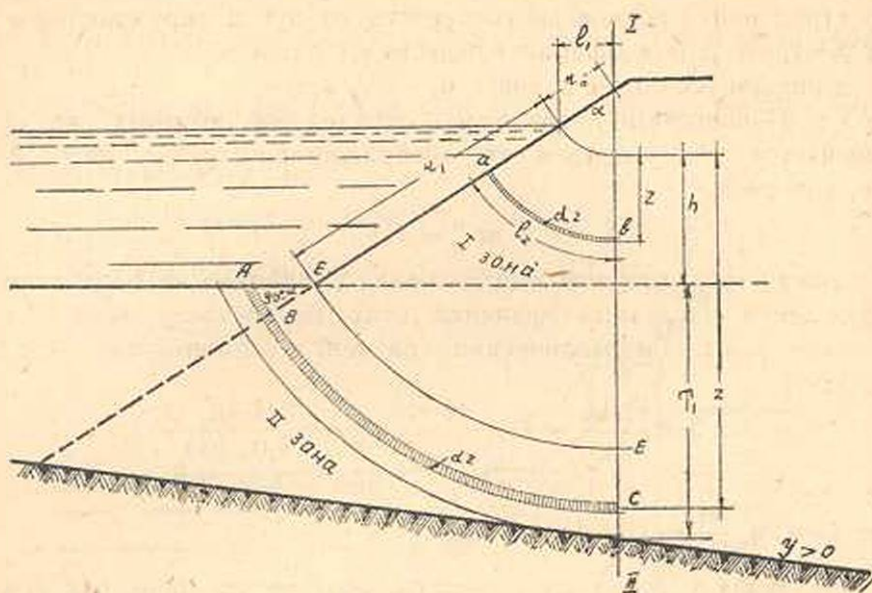


Рис. 2 б

и, следовательно, интегрируя в пределах от 0 до r_1 , получим:

$$q_1 + \frac{K(H-h)}{\delta_1} \int_0^{r_1} \frac{dz}{z+r_0} = \frac{K(H-h)}{\delta_1} [\ln(r_0+r_1) - \ln r_0] \quad (7)$$

Длина струйки во второй зоне складывается из двух отрезков АВ и ВС и, следовательно, равна:

$$\begin{aligned} l_2 &= AB + BC = 2\pi(z-r_1) \frac{90-\alpha}{360} + \delta_1(z+r_0) = \\ &= \delta_1(z+r_0) + \delta_2(z-r_1), \end{aligned}$$

где
$$\delta_2 = \frac{2\pi(90-\alpha)}{360}.$$

Величина δ_2 представляет угол $90^\circ - \alpha$ в радианах. Попутно заметим, что $\delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi}{2}$.

Для второй зоны тоже потеря напора будет $H-h$. Гидравлический градиент равен:

$$J = \frac{H-h}{l_2} = \frac{H-h}{\delta_1(z+r_0) + \delta_2(z-r_1)};$$

скорость по закону Дарси равна:

$$V = KJ = K \frac{H-h}{\delta_1(z+r_0) + \delta_2(z-r_1)};$$

элементарный расход во второй зоне равен:

$$dq_2 = V \cdot dz = \frac{K(H-h)dz}{\delta_1(z+r_0) + \delta_2(z-r_1)}$$

Интегрируя в пределах от r_1 до $h+T_1$, получим расход во второй зоне:

$$q_2 = K(H-h) \int_{r_1}^{h+T_1} \frac{dz}{\delta_1(z+r_0) + \delta_2(z-r_1)} =$$

$$= \frac{K(H-h)}{\delta_1 + \delta_2} \ln \frac{\delta_1 h + \delta_1 T_1 + \delta_2 T_1 + \delta_2 20 - \delta_2 r_0}{\delta_1 r_1 + \delta_2 r_0}$$

Подставляя сюда значения

$$r_0 = 1,1H - h, \quad T_1 = T_0 - JX_0, \quad X_0 = 1,1mH, \quad r_1 = \frac{H}{\cos \alpha},$$

получим:

$$q = \frac{K(H-h)}{\delta_1 + \delta_2} \ln \frac{(\delta_1 + \delta_2)(h + T_0 - 1,1mHJ) +}{\delta_1 H \left(1,1 + \frac{H}{\cos \alpha} \right) - \delta_1 h}$$

$$+ \frac{1,1\delta_1 H - \delta_1 h - \delta_2 \frac{H}{\cos \alpha}}{\delta_1 H \left(1,1 + \frac{H}{\cos \alpha} \right) - \delta_1 h} \quad (8)$$

Суммируя с расходом 1 зоны q_1 , получим полный расход фильтрации через низовой клин.

$$q = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \ln \left\{ \frac{H \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - h}{1,1H - h} + \right.$$

$$\left. + \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \ln \frac{(\delta_1 + \delta_2)(h + T_0 - 1,1mHJ) + 1,1\delta_1 H - \delta_1 h - \delta_2 \frac{H}{\cos \alpha}}{H\delta_1 \left(1,1 + \frac{1}{\cos \alpha} \right) - \delta_1 h} \right\}$$

Расчет средней части плотины

В средней части плотины поток движется почти по наклонному основанию, аналогично перемычке с вертикальными стенками.

Для средней части плотины, очевидно, применима формула Дюпюи, что и принято во всех основных работах для расчета средней части плотины с горизонтальным водоупором.

Обозначим через y высоту кривой депрессии в теле плотины на расстоянии X от раздельного сечения I—I.

Гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h_0 + T_0 - (X_0 + l) \cdot J}{J} + \frac{q}{KJ^2} \left[\frac{h + T_0 - (X_0 + l)J}{J} + \frac{q}{KJ^2} (h_0 - h - Jx) \right] e^{\frac{KJ}{q} (h_0 - h - Jx)} \quad (10)$$

Расчет низового клина

Рассмотрим два случая:

I. $h_0 + T_2 = r_2$ и II. $h_0 + T_2 > r_2$ (см. черт. 4а)

I случай: $h_0 + T_2 < r_2$ или $h_0 + T_2 < \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$

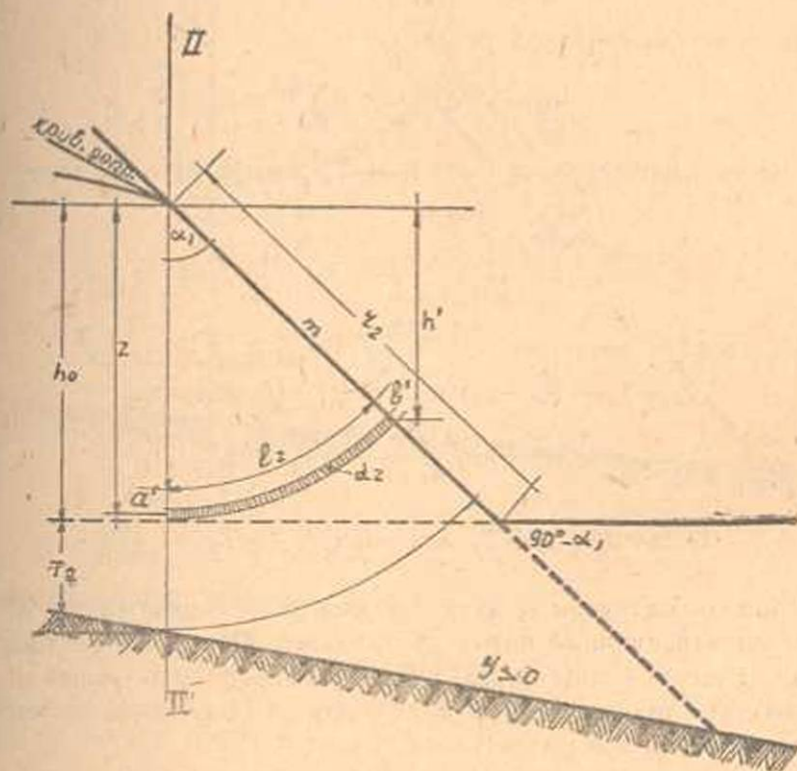


Рис. 4 а.

Возьмем элементарную струйку $a'b' = l_{z_1}$ толщиной d_{z_1} , проходящую между раздельным сечением II-II низовым откосом на глубину z_1 .

Если приблизительно принять траекторию струй за дуги концентрических окружностей с центром в верхней точке раздельного сечения O' , то длина струйки l_{z_1} определяется следующим образом:

$$l_{z_1} = \frac{2\pi \alpha_1 z_1}{360^\circ}.$$

где: α_1 — угол низового откоса.

Здесь также линии токов несколько длиннее дуг окружностей, поэтому уточненное выражение длины струйки следует написать с поправочным коэффициентом β_2 . Однако, мы его принимаем равным единице по той же причине, что и коэффициент β_1 .

Гидравлический градиент элементарной струйки будет:

$$J = \frac{h'}{l_{z_1}} = \frac{z_1 \cdot \cos \alpha_1}{\frac{2\pi \alpha_1}{360} \cdot z_1} = \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3}, \text{ где } \delta_3 = \frac{2\pi \alpha_1}{360}.$$

Скорость по закону Дарси равна:

$$V = KJ = K \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3};$$

элементарный расход равен:

$$dq = V \cdot dz_1 = K \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3} dz_1.$$

Интегрируя в пределах от 0 до $h_0 + T_2$, получим:

$$q = K \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3} \int_0^{h_0 + T_2} dz_1 = K \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3} (h_0 + T_2).$$

Подставляя значения:

$T_2 = T_0 - J(1 + x_0)$ и $x_0 = 1,1 \text{ мН}$, получим:

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 + T_0 - J(1 + 1,1 \text{ мН})}{\delta_3} \cos \alpha_1 \quad (11)$$

II случай: $h_0 + T_2 \geq r_2$ или $h_0 + T_2 > \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$.

Проводя радиусом r_2 дугу из центра O' через точку E' , разобьем фильтрационный поток на две зоны. Обозначим расход, проходящий в первой зоне через q_1 , а во второй зоне — через q_2 (см. черт. 4б). По предыдущему, расход любой элементарной струйки, расположенной в пределах I зоны, будет

$$dq_1 = \frac{k \cdot \cos \alpha_1}{\delta_3} dz_1 \text{ и, следовательно, интегрируя в пределах от } 0$$

до r_2 , получим:

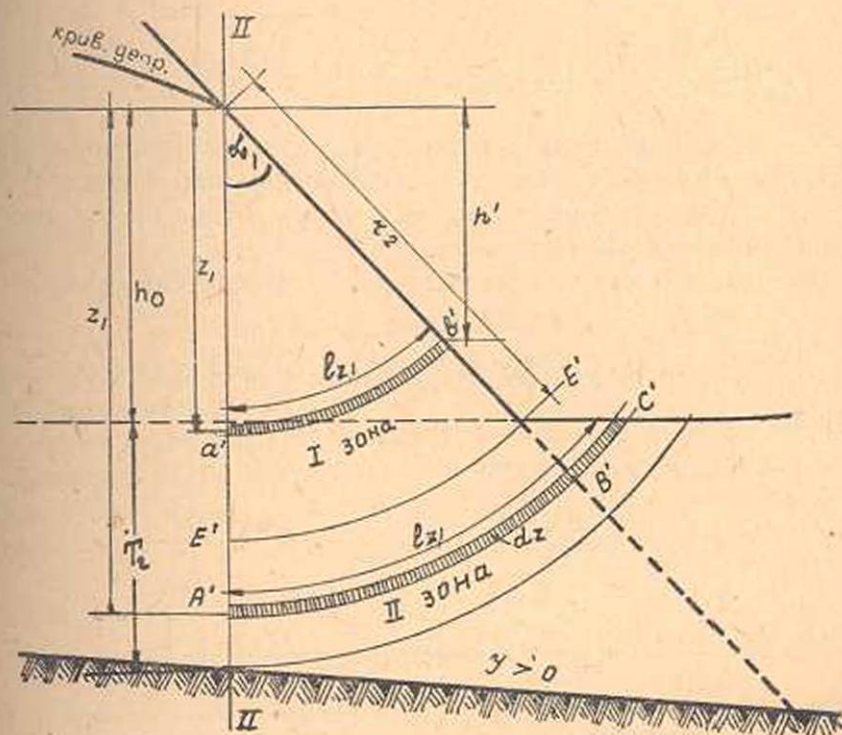
$$q_1 = K \frac{\cos \alpha_1}{\delta_3} \cdot r_2.$$

Длина струйки во второй зоне складывается из двух отрезков $A'B' + B'C'$ и, следовательно, равна:

$$l_{z_1} = A'B' + B'C' = \delta_3 z_1 + \frac{2\pi(90-\alpha)}{360} (z_1 - r_2) = \delta_3 z_1 + \delta_4 (z_1 - r_2),$$

где

$$\delta_4 = \frac{2\pi(90-\alpha)}{360};$$



Черт. 46.

гидравлический градиент равен:

$$J = \frac{h_0}{l_{z_1}} = \frac{h_0}{\delta_3 z_1 + \delta_4 (z_1 - r_2)};$$

скорость по закону Дарси равна:

$$V = KJ = K \frac{h_0}{\delta_3 z_1 + \delta_4 (z_1 - r_2)};$$

элементарный расход равен:

$$dq_2 = \frac{Kh_0 dz_1}{\delta_3 z_1 + \delta_4 (z_1 - r_2)}.$$

Интегрируя в пределах от r_2 до $h_0 + T_2$, получим:

$$q_2 = Kh_0 \int_{r_2}^{h_0 + T_2} \frac{dz_1}{\delta_3 z_1 + \delta_4 (z_1 - r_2)} = \frac{K h_0}{\delta_3 + \delta_4} \ln \frac{\delta_3 (h_0 + T_2) + \delta_4 (h_0 + T_2 - r_2)}{\delta_3 r_2}.$$

Подставляя значения: $T_2 = T_0 - J(1+x_0)$ и $x_0 = 1,1 \text{ мН}$, получим:

$$q_2 = \frac{Kh_0}{\delta_3 + \delta_4} \ln \frac{\delta_3 [h_0 + T_0 - J(1+1,1 \text{ мН})] + \delta_4 [h_0 + T_0 - J(1+1,1 \text{ мН})]}{\delta_3 r_2}$$

Суммируя с расходом 1 зоны q_1 , получим общий расход низового клина:

$$q = k \left\{ \frac{h_0}{\delta_3} + \frac{h_0}{\delta_3 + \delta_4} \ln \left[\cos \alpha_1 \left(1 + \frac{\delta_4}{\delta_3} \right) \left(1 + \frac{T_0 - 1,1 \text{ мН}}{h_0} \right) - \frac{\delta_4}{\delta_3} \right] \right\}$$

Таким образом, нами в нескольких вариантах получены фильтрационные уравнения для всех трёх частей плотины с неизвестными q , h , h_0 , l . Четвертое уравнение получается весьма просто, как соотношение между элементами плотины.

Расстояние между двумя отдельными течениями равно:

$$l = L_{\text{пл}} - \text{мН}_0 - m_1 h_0 = L_{\text{пл}} - 1,1 \text{ мН} - m_1 h_0.$$

Составление систем фильтрационных уравнений:

I Случай: $h + T_1 \leq r_1$ и $h_0 + T_2 \leq r_2$;

при малой мощности пронизываемого слоя

$$q = \frac{k(H-h)}{\delta_1} \ln \frac{1,1H + T_0 - 1,1 \text{ мН}}{1,1H - h}$$

$$l = \frac{h_0 + T_0(x_0+1) \cdot J}{J} + \frac{q}{KJ^2} - \left[\frac{h + T_0 - (x_0+1)I}{J} + \frac{q}{KJ^2} \right] e^{\frac{KJ}{q}(h_0 - h - Je)}$$

$$q = K \frac{h_0 + T_0 - J(1+1,1 \text{ мН})}{\delta_2} \cdot \cos \alpha_1,$$

$$l = L_{\text{пл}} - 1,1 \text{ мН} - m_1 h_0.$$

II Случай: $h + T_1 \leq r_1$, но $h_0 + T_2 > r_2$;

при средней мощности пронизываемого слоя

$$q = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \ln \frac{1,1H + T_0 - 1,1 \text{ мН}}{1,1H - h},$$

$$l = \frac{h_0 + T_0 - (x_0+1)J}{J} + \frac{q}{KJ^2} - \left[\frac{h + T_0 - (x_0+1)J}{J} + \frac{q}{KJ^2} \right] e^{\frac{KJ}{q}(h_0 - h - Je)}$$

$$q = k \left\{ \frac{h_0}{\delta_3} + \frac{h_0}{\delta_3 + \delta_4} \ln \left[\cos \alpha_1 \left(1 + \frac{\delta_4}{\delta_3} \right) \left(1 + \frac{T_0 - 1,1 \text{ мН}}{h_0} \right) - \frac{\delta_4}{\delta_3} \right] \right\}$$

$$l = L_{\text{пл}} - 1,1 \text{ мН} - m_1 h_0.$$

III Случай: $h + T_1 > r_1$ и $h_0 + T_2 > r_2$;

при большой мощности пронизываемого слоя

$$q = \frac{K(H-h)}{\delta_1} \left\{ \ln \frac{H \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - h}{1,1 H - h} + \right.$$

$$\left. + \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \ln \frac{\delta_1 + \delta_2 (h + T_0 - 1,1 mH) + J 1,1 \delta_1 H - \delta_1 h - \delta_2 \frac{H}{\cos \alpha}}{H \delta_1 \left(1,1 + \frac{1}{\cos \alpha} \right) - \delta_1 h} \right\}$$

$$I = \frac{h_0 + T_0 - (x_0 + 1) J}{J} + \frac{q}{KJ^2} - \left[\frac{h + T_0 - (x_0 + 1) J}{J} + \frac{q}{KJ^2} \right] e^{\frac{KJ}{q} (h_0 - h - Jc)}$$

$$q = K \left\{ \frac{h_0}{\delta_3} + \frac{h_0}{\delta_3 + \delta_4} \ln \left[\cos \alpha_1 \left(1 + \frac{\delta_4}{\delta_3} \right) \left(1 + \frac{T_0 - 1,1 mH J}{h_0} \right) \right] - \frac{\delta_4}{\delta_3} \right\}$$

$$I = L_{пл} - 1,1 mH - m_1 h_0.$$

Эти системы обычным путем не решаются. Они решаются путем составления таблиц и номограмм.

Чтобы не перегрузить настоящую статью, решение этих систем не приводится. Они будут опубликованы отдельной статьей, в которой будет видна предельная простота использования данного расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Павловский—О фильтрации воды через земляные плотины на непроницаемых основаниях. Москва, 1931.
2. А. А. Угиниус—Расчет фильтрации через земляные плотины г. Москва, 1940.
3. А. М. Мхитарян—Фильтрация воды через земляные плотины на проницаемых основаниях. 1944. Библиотека МИСИ им. Куйбышева, или Изв. АН Арм. ССР, № 5, 1947.
4. П. А. Шанкин—Расчет фильтрации в земляных плотинах. Москва, 1947.

Ա. Մ. Մխիթարյան

ԶՐԻ ՖԻԼՏՐԱՑԻԱՆ ԶՐԱԹԱՓԱՆՑ ՇԵՐՏԻ ՎՐԱ ԳՏՆՎՈՂ ԹԵՔ
ԶՐԱՄԵՐՁ ՀԻՄՔՈՎ ՀՈՂԱՅԻՆ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ՄԱՐՄՆՈՎ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ներկա աշխատանքով մենք տալիս ենք ջրաթափանց շերտի վրա գտնվող թևք ջրամերձ հիմքով հողային պատվարների մարմնով կատարվող ֆիլտրացիոն հաշվարկները հիդրավլիկական մեթոդով, նման պատվարների պրակտիկայում շատ հաճախ ենք պատահում, մինչդեռ նրանց

վերաբերյալ հաշվարկը գրականության մեջ բոլորովին չի լուսարանված։ Ուստի մեր աշխատանքն ունի գիտական ու գործնական նշանակություն։

Հաշվարկը կատարվում է հետևյալ կերպ. սկստվա՛րն իր ջրաթափանց շերտով բաժանվում է 3 մասի և հավասարումը յուրաքանչյուր մասի համար արտածվում է ինքնուրույն կերպով։ Ստացած հավասարումները միասին լուծելիս ստացվում են ֆիլտրացիոն ելքը և ղեղը բեռնոն կորի էլեմենտները։