

А. М. Мхитарян

Фильтрация воды через земляные плотины на проницаемых основаниях с водой на н. б.

Вопросы теории фильтрации и фильтрационного расчета земляных плотин имеют большое практическое значение, поскольку устойчивость плотин в значительной степени обусловлена их способностью противостоять фильтрационному потоку, а также для правильной оценки возможных потерь из водохранилища. По этому вопросу имеется довольно обширная литература, но подавляющее большинство работ посвящено исследованию фильтрации через земляные плотины на водоупоре, в то время как наибольшее практическое значение имеет расчет плотин на проницаемых основаниях.

Обзор работ о фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях.

Работы о фильтрации через земляные плотины, опубликованные до 1931 г., были основаны на ряде грубых допущений, совершенно искажающих природу явления. Впервые вопрос по фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях получил приемлемое разрешение в работе Акад. Н. Н. Павловского [1]. Однако и она не свободна от недочетов. Допущение о горизонтальности фильтрационных струек приводит к преувеличению роли низового и в особенности верхового клина в гашении напора, т. е. к ошибке в нежелательном направлении.

В 1934 г. весьма интересное решение дано доктором инженером Дахлером [2], положенное ныне в основу норм и технических условий по фильтрационным расчетам НИИГ.

Однако, вопрос фильтрации через низовой клин получил еще менее удовлетворительное решение, чем у Шаффернака [3] и у Павловского.

Проф. А. А. Угинчус [4] в своей диссертационной работе для верхового клина принимает за основу метод Павловского, опираясь на данные натуральных наблюдений и учитывая возможность фильтрационного уплотнения повышающего сопротивление фильтрации. Однако, выводы Угинчуса в этой части весьма сомнительны, поскольку вышеупомянутые материалы относятся к плотинам с проницаемым основанием, которым свойственно более низкое положение депрессии, а фильтрационное уплотнение не всегда получает развитие и в первые годы совсем отсутствует. Для низового клина Угинчус принимает решение Казагранде [5], но последнее весьма не совершенно и это обстоятельство признает сам Угинчус в своей последующей работе. Таково современное состояние вопроса о фильтрационном

расчете плотин на непроницаемом основании. Работами Павловского, Дахлера и Угинчуса эта проблема получила в основном удовлетворительное решение.

В следующих наших работах мы дадим свое решение, вытекающее, как частный случай, из более общих формул фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях и дадим оценку точности, которая покажет, что наши формулы имеют все преимущества над упомянутыми решениями.

Необходимо только экспериментальное разрешение ряда вопросов о роли верхового и низового клиньев в целях введения поправочных коэффициентов β_1 и β_2 [9] к имеющимся гидравлическим формулам.

Обзор работ о фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях.

Теория вопроса о фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях до последнего времени отсутствовала. Имеется ряд грубо ориентировочных предложений и ограниченное число опытных данных. Интерес представляет только работа Джестина [6], который, заменив депрессионную кривую прямой, пытается определить положение ее в теле плотины и условие выклинивания на сухой откос (или поглощения фильтрационного потока в толщу основания). Им же даны формулы, позволяющие определить такую ширину плотины, при которой фильтрационный поток не будет выклиниваться на низовом откосе. С гидравлической точки зрения решение Джестина грубо ошибочно, т. к. положение линии депрессии внутри профиля вообще невозможно.

Кроме того, в своих исследованиях мы пришли к тому выводу, что в подавляющем большинстве случаев достичь поглощения фильтрационных вод в толще основания можно только применив специальные противофильтрационные устройства (замки, ядра, экран и т. п.).

В опубликованной в 1945 г. статье „Фильтрация воды через земляную плотину на проницаемом основании“ проф. Ведерников [7] берет земляную плотину трапециoidalного профиля с дренажом и проницаемым слоем неограниченно большой мощности. В результате ряда допущений (как например, верховой откос принимает как за дугу окружности, скорость у дренажа стремится к бесконечности и т. п.) получает простую формулу, пригодную для практики. Однако это решение является частным случаем своего названия.

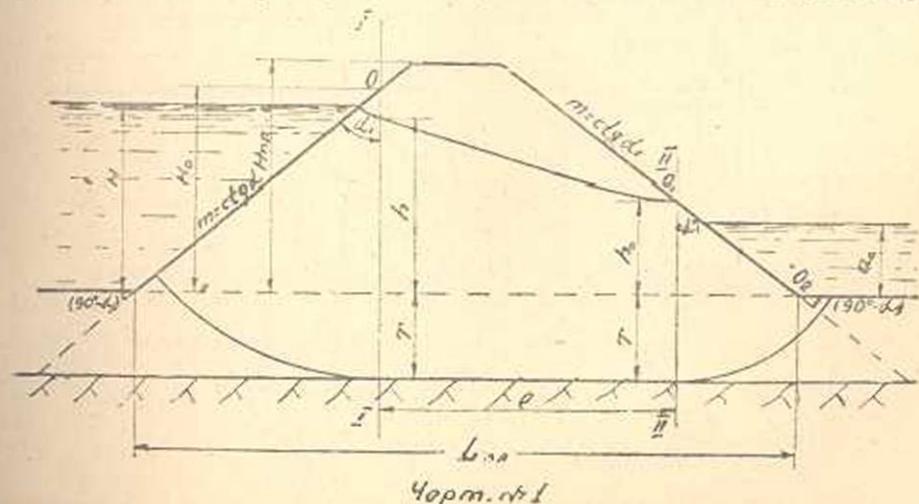
В 1947 г. вышла книга проф. Ф. Б. Нельсона-Скорнякова [8] „Фильтрация в однородной среде“, в которой автор, в своем гидромеханическом решении, дает расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях, с дренажом, с противофильтрационными устройствами и т. п. Однако решение у него построено на достаточно произвольных упрощениях в пограничных условиях.

Очертание верхового откоса (принятое в одном случае горизонтальным, в другом вертикальным) получилось весьма заметно отличающимся от имеющих место в действительности. В этом решении водохранилище определенного дна так же не имеет. Таким образом, при применении этих упрощенных решений к конкретным расчетам всегда остается неясным вопрос—насколько в каждом частном случае эти большие отклонения от действительного очертания верхового откоса и дна сказываются на точности расчета.

В 1947 г. мы дали гидравлическое решение фильтрационного расчета для плотин трапециoidalного профиля [9]. Линии токов в пределах верхового и низового клиньев приняты криволинейными как дуги концентрических окружностей. Полученные уравнения решаются графическим способом. В работе приведено несколько примеров, показывающих предельную простоту этого решения. Нами дана оценка точности получаемых формул**, где видно, что результаты прекрасно совпадают с опытными данными других авторов. Указанная работа посвящена расчету фильтрации земляных плотин при отсутствии воды на нижнем бьефе, между тем наиболее часто встречающимся случаем является плотина при наличии воды на бьефе. Этому случаю, как наиболее общему из всех выше указанных, посвящена настоящая работа. Полученные нами формулы [9] для верхового клина и средней части плотины здесь остаются без изменения. Только дадим новые формулы для низового клина, решение которых с формулами верхового клина и средней части плотины даст полный фильтрационный расчет земляных плотин.

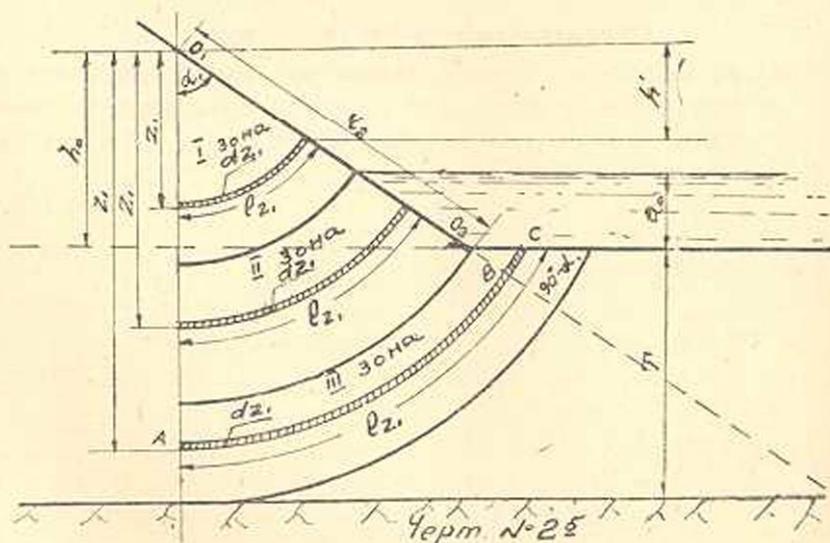
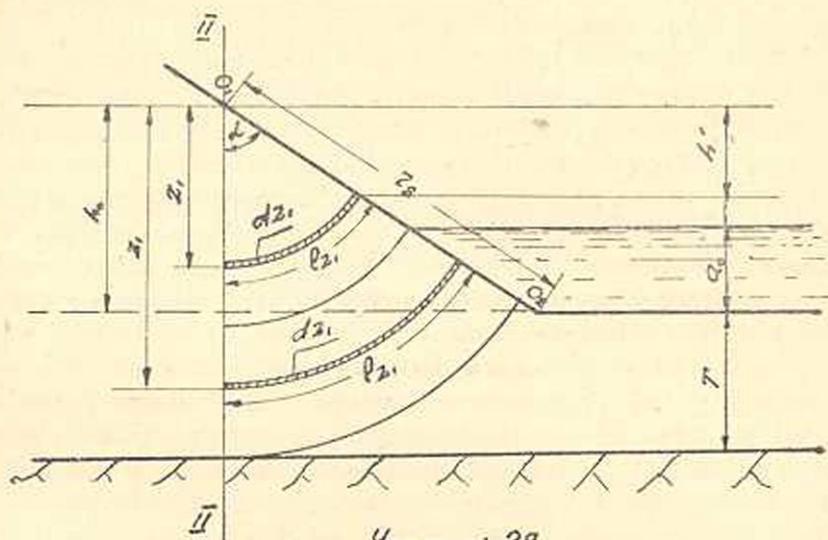
Предлагаемое решение автора

Возьмем земляную плотину обычного трапециoidalного профиля с проницаемым основанием и разобьем ее на 3 части сечением I—I и II—II (см. черт. 1) точно так, как сделано в нашей работе [9].



* Эта работа выйдет отдельной статьей.

При движении воды через низовой клин встречается 2 случая:
 1) Когда имеем малую толщину проницаемого слоя T , самая нижняя линия тока выклинивается на низовом откосе плотины, т. е. имеем $h_0 + T < r_2$ (см. черт. 2а) и 2) Когда имеем большую толщину проницаемого слоя T , самая нижняя линия тока выклинивается на дне нижнего бьефа, т. е. имеем $h_0 + T > r_2$ (см. черт. 2б).



1 случай—когда $h_0 + T < r_2$ или $h_0 + T < \frac{h_0}{\cos z_1}$. . . (1)

Разбиваем область фильтрации на 2 зоны, проведя дугу радиусом r_2 из центра O_1 . Обозначим расход в I зоне q_1 , а во II— q_2 .

Разбиваем область фильтрации в этот раз на 3 зоны. (см. черт. 26).

Обозначим расход в I зоне через q_1 , в II-ой— q_2 и в III— q_3 .
В I зоне гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h'}{l_{z_1}} = \frac{Z_1 \cdot \cos \alpha_1}{g_2 Z_1} = \frac{\cos \alpha_1}{g_2}$$

Скорость по Дарси равна $V = KI = K \frac{\cos \alpha_1}{g_2}$

Элементарный расход в I зоне равен $dq_1 = K \frac{\cos \alpha_1}{g_2} dz_1$.

Интегрируя в пределах от $Z_1 = 0$ до $Z_1 = r_2 - \frac{a_0}{\cos \alpha_1}$

и учитывая, что $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$, получим

$$q_1 = \frac{K}{g_2} (h_0 - a_0).$$

Во II зоне гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h_0 - a_0}{l_{z_1}} = \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1}.$$

Скорость по Дарси $V = KI = K \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1}$.

Элементарный расход во II зоне равен:

$$dq_2 = K \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1} dz_1.$$

Интегрируя в пределах от $Z_1 = r_2 - \frac{a_0}{\cos \alpha_1}$ и $Z_1 = r_2$ и учитывая,

что $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$, получим

$$q_2 = K \frac{h_0 - a_0}{g_2} \ln \frac{h_0}{h_0 - a_0}.$$

В III зоне длина струйки складывается из:

- 1) дуги АВ, проведенной из центра O_1 ;
- 2) дуги ВС, проведенной из центра O_2 ;

общая длина элементарной струйки фильтрации будет:

$$l_{z_1} = 2\pi\beta_1 \frac{\alpha_1}{360} Z_1 + 2\pi\beta_1 \frac{90 - \alpha_1}{360} (z_1 - r_2) \text{ или}$$

$$l_{z_1} = g_2 z_1 + g_4 (z_1 - r_2), \text{ где } g_4 = 2\pi\beta_1 \frac{90 - \alpha_1}{360};$$

гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)};$$

скорость по Дарси равна:

$$V = KI = K \frac{h_0 - a_0}{g_3 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)} ;$$

элементарный фильтрационный расход равен:

$$dq_1 = K \frac{(h_0 - a_0) dz_1}{g_3 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)} .$$

Интегрируя в пределах от $Z_1 = r_2$ и до $Z_1 = h_0 + T$ и учитывая, что $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$, получим:

$$q_1 = \frac{K(h_0 - a_0)}{g_3 + g_4} \ln \left[\cos \alpha_1 \left(1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left(1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right] .$$

Суммируя расходы q_1 , q_2 и q_3 , получим расчетную формулу фильтрационного расхода, проходящего через низовой клин.

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_1} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \frac{g_2}{g_3 + g_4} \ln \left[\cos \alpha_1 \left(1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left(1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right] \right\} . . . (4)$$

Таким образом, для низового клина получили 2 уравнения.

Уравнения для верхового клина и средней части плотины при наличии воды на нижнем бьефе или без нее остаются без изменения. Поэтому перепишем эти уравнения из нашей работы [9] и для определения входной ординаты h , выходной ординаты h_0 , расхода Q и расстояния между сечениями I—I и II—II—I составим системы уравнений для разных случаев.

Уравнения верхового клина для первого случая, когда $h + T < r_1$ или $h + T < \frac{H_0}{\cos \alpha}$. . . (5)

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \ln \frac{1,1 H + T}{1,1 H - h} . . . (6)$$

Для второго случая, когда $h + T > r_1$ или $h + T > \frac{H}{\cos \alpha}$. . . (7)

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \left[\ln \frac{H \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - h}{1,1 H - h} + \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \ln \frac{(g_1 + g_2) T + g_1 h + 1,1 g_1 H - g_2 \frac{H}{\cos \alpha}}{g_1 H \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - g_2 h} \right] . . . (8)$$

Уравнение средней части для I и II случаев будет одинаково и равно:

$$\frac{q}{k} = (h - h_0) T + \frac{h^2 - h_0^2}{2} . . . (9)$$

Четвертое уравнение получим весьма просто, как соотношение между элементами плотины:

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

Составим системы фильтрационных уравнений для 3-х случаев: малой, средней и большой мощности проницаемого слоя.

Случай 1 — при малой мощности проницаемого слоя, когда для низового клина

$$h_0 + T \leq r_2 \text{ или } h_0 + T < \frac{h_0}{\cos z_1}$$

и для верхового клина

$$h + T < r_1 \text{ или } h + T < \frac{H}{\cos z}$$

Система фильтрационных уравнений имеет сравнительно простой вид:

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \ln \frac{1,1 H+T}{1,1 H-h} \quad \dots (6)$$

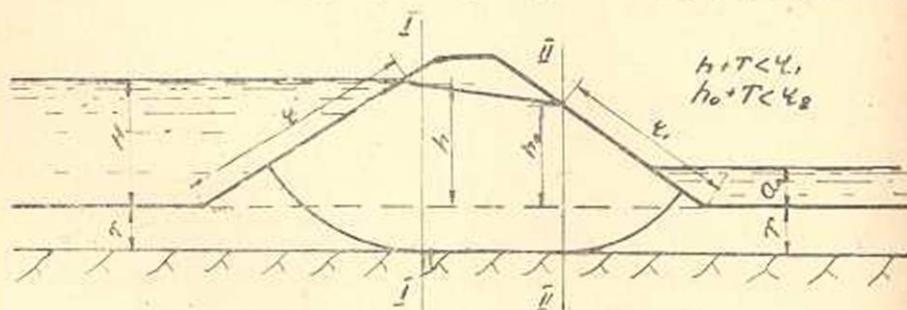
$$\frac{q}{k} \cdot l = T(h-h_0) + \frac{h^2-h_0^2}{2} \quad \dots (9)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_2} \ln \frac{(h_0 + T) \cos z_1 \cdot e}{h_0 - a_0} \quad \dots (3)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

Случай 2 — когда для верхового клина $h + T < r_1$ или $h + T < \frac{H}{\cos z_1}$ и для низового клина $h_0 + T > r_2$ или $h_0 + T > \frac{h_0}{\cos z_1}$

При средней мощности проницаемого слоя самая нижняя линия тока выклинивается из верхового откоса и вклинивается на линию дна нижнего бьефа (см. черт. 3). Этот случай, повидимому,



является наиболее распространенным в плотиностроении. Уравнение для низового клина в этом случае приобретает более сложную структуру и система переписывается так:

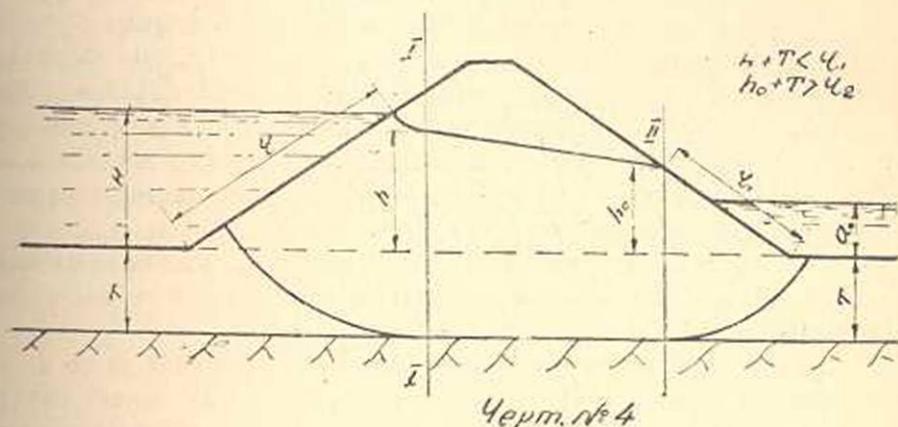
$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \ln \frac{1,1 H+T}{1,1 H-h} \quad \dots (6)$$

$$\frac{q}{k} l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad \dots (3)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_3} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \right. \\ \left. + \frac{g_3}{g_3 + g_1} \ln \left[\cos z_1 \left(1 + \frac{g_1}{g_3} \right) \left(1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_1}{g_3} \right] \right\} \quad \dots (4)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

Случай 3 — При большой мощности проницаемого слоя, когда для низового клина $h_0 + T > r_2$ или $h_0 + T > \frac{h_0}{\cos z_1}$ и для верхового клина $h + T > r_1$ или $h + T > \frac{H}{\cos z}$.



Самая нижняя линия тока выклинивается из дна верхнего бьефа и вклинивается на дно нижнего бьефа.

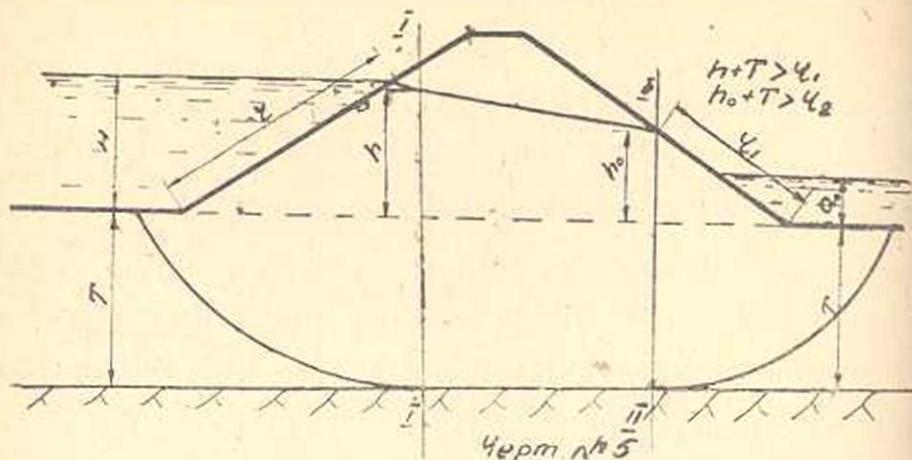
Система уравнений по причине сложности очертаний фильтрующей среды приобретает наиболее сложный вид, а именно:

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \left[\ln \frac{H \left(\frac{1}{\cos z} + 1,1 \right) - h}{1,1 H - h} + \right. \\ \left. + \frac{g_1}{g_1 + g_3} \ln \frac{(g_1 + g_3) T + g_3 h + 1,1 g_1 H - g_3 \frac{H}{\cos z}}{g_1 H \left(\frac{1}{\cos z} + 1,1 \right) - g_3 h} \right] \quad \dots (8)$$

$$\frac{q}{k} \cdot l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad \dots (3)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_3} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \right. \\ \left. + \frac{g_3}{g_3 + g_1} \ln \left[\cos z_1 \left(1 + \frac{g_1}{g_3} \right) \left(1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_1}{g_3} \right] \right\} \quad \dots (4)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$



Полученные нами уравнения несравненно сложнее уравнения акад. Павловского и уравнения для плотин при $a_0 = 0$, полученных нами ранее [9], причем как в нашей другой работе [9], так и здесь, с ростом глубины пронизываемого слоя T меняется и сама структура расчетных уравнений. Этого и следовало ожидать, поскольку контуры фильтрующей среды в рассмотренной нами задаче отличаются сложностью и изменяются с увеличением T .

Эти системы не решаются аналитическим способом; их можно решать только при помощи составления графиков и таблиц и номографирования.

Ввиду перегрузки настоящей статьи, эти решения здесь не приводятся. Этот вопрос будет освещен в следующих наших работах.

Решение аналогичных уравнений даны нами в нашей предыдущей работе [9].

Поступило 15 VII 1948.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский Н. Н. — О фильтрации воды через земляные плотины на непроницаемых основаниях. Москва, 1931.
2. Dachler — Die Wasserwirtschaft, № 4–6, August, 1934.
3. Schaffernak — Allgemeine Bauzeitung, Heft 4, 1917.
4. Угинчус А. А. — Расчет фильтрации через земляные плотины. Москва, 1940.
5. Casagrande — № 46 Rapport, Доклады международного конгресса в Стокгольме, 1932.
6. Дж. Джестик — Земляные плотины. Перевод с англ. ОНТИ, 1936.
7. Ведерников В. В. — Фильтрация через земляные плотины на непроницаемых основаниях. ДАН СССР, т. 56, 1945.
8. Нельсон-Скорняков Ф. Б. — Фильтрация в однородной среде. Москва, 1947.
9. Мхитарян А. М. — Фильтрация воды через земляные плотины на пронизываемых основаниях. Изв. АН Арм. ССР (Естеств. науки) № 5, 1947.

Ա. Մ. Մխիթարյան

ՋՐԻ ՖԻԼՏՐԱՑԻԱՆ ՋՐԱԹԱՓԱՆՑ ՀԻՄՔԵՐԻ ՎՐԱ ԳՏՆՎՈՂ
ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ՄԱՐՄՆՈՎ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ջրի ֆիլտրացիայի հարցերը հողային պատվարների մարմնով համարվում են շատ կարևոր՝ կառուցվածքի կայունությունը և ապահովությունը ճիշտ գնահատելու և ջրամբարից հնարավոր կորուստները որոշելու համար:

Հողվածում տրված է ակնարկ ինչպես ջրաթափանց, այնպես էլ ջրանթափանց հիմքերի վրա գտնվող պատվարների մարմնով կատարվող ֆիլտրացիային նվիրված աշխատանքների: Բերված է հեղինակի լուծումը ջրաթափանց հիմքերի վրա գտնվող հողային պատվարների մարմնով կատարվող ֆիլտրացիայի վերաբերյալ՝ ներքին բեյֆում ջրի ասկայությունը ղեկավարելու: Այս դեպքին պրակտիկայում ամենից հաճախ ենք հանդիպում և այն դրականություն մեջ ամենից քիչ է լուսաբանված: Ստացված հավասարումներն անհամեմատ բարդ են, քան ակադեմիկոս Պալլոսկու հավասարումները և հեղինակի նախորդ հավասարումները, բայց սրանց նուստի հաշվումը միանգամայն հնարավոր է:

Այդ լուծումները հողվածում չեն բերված. նրանք կլուսաբանվեն հեղինակի հետագա աշխատանքներում:

