

С. Ф. АВЕРЬЯНОВ

**ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА РОЛИ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗОНЕ
«КАПИЛЛЯРНОЙ КАЙМЫ»**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 6 IX 1949)

В практике гидротехнического строительства и мелиорации многие потоки грунтовых вод со „свободной“ поверхностью имеют сравнительно большие горизонтальные протяжения по отношению к их глубинам (потоки грунтовых вод в естественном состоянии, фильтрация через земляные плотины, фильтрация из крупных оросительных каналов при близких грунтовых водах и ряд других случаев). Для таких потоков характерно наличие между поверхностью земли и поверхностью грунтовых вод зоны неполного насыщения грунта, по которой влага передвигается более или менее параллельно основному потоку грунтовых вод.

На значение капиллярной зоны для теории фильтрации впервые обратил внимание Н. Е. Жуковский в своих работах по движению грунтовых вод (1889 — 1890 г.)^(1,2); в 1923 г. он же⁽³⁾ предложил принимать за „поверхность осушения“ поверхность с давлением, меньшим атмосферного на величину высоты капиллярного поднятия. Тем самым в области движения грунтовых вод была включена капиллярная зона, причем законы передвижения воды в ней были приняты теми же, что и для зоны собственно грунтовых вод, и отличие между этими зонами было сведено к различию в величине давления: зона с давлением $p > p_{атм}$ принималась за область грунтовых вод, зона с $p < p_{атм}$ — за капиллярную зону. В дальнейшем, исходя из этих же положений, рядом авторов были получены решения для определения фильтрационных потерь из каналов⁽⁴⁻⁷⁾. С другой стороны, большинство исследователей считают возможным пренебрегать, ввиду малости, величиной расхода, текущего в капиллярной зоне, и принимать за границу области движения поверхность грунтовых вод⁽⁸⁻¹⁰⁾. Существенно, хотя бы для простейших случаев передвижения воды в капиллярной зоне, количественно оценить ее участие в общем потоке грунтовых вод.

Рассмотрим передвижение в зоне „капиллярной каймы“, т. е. в случае передвижения капиллярного потока более или менее параллельно основному потоку грунтовых вод. Расход, проводимый плавно изменяющимся установившимся потоком грунтовых вод без учета движения в капиллярной зоне, может быть достаточно точно определен величиной q_0 (на единицу ширины потока)

$$q_0 = k_{\omega_1} \frac{\Delta H}{L} h_{ср}, \quad (1)$$

где k_{ω_1} — коэффициент водопроницаемости грунта при полной его влагоемкости ω_1 с учетом защемленного воздуха; ΔH — падение на-

пора на длине L при средней глубине потока на этой длине $h_{\text{ср}}$; при обычном способе осреднения $h_{\text{ср}} = \frac{H_1 + H_2}{2}$. Расход зоны „капиллярной каймы“ для общего случая, когда расстояние y_0 от поверхности грунтовых вод до поверхности земли меньше или равно максимальной

высоте капиллярного поднятия H_k , может быть определен как:

$$q_k = \frac{\Delta H}{L} \int_0^{y_0} k_y dy, \quad (2)$$

где k_y — переменная капиллярная проницаемость на высоте y от поверхности грунтовых вод, зависящая от влажности почвогрунта.

Примем, что влажность при капиллярном поднятии распределяется по высоте параболически, что достаточно хорошо подтверждается опытными данными ((^{11,12}) и др.). Тогда

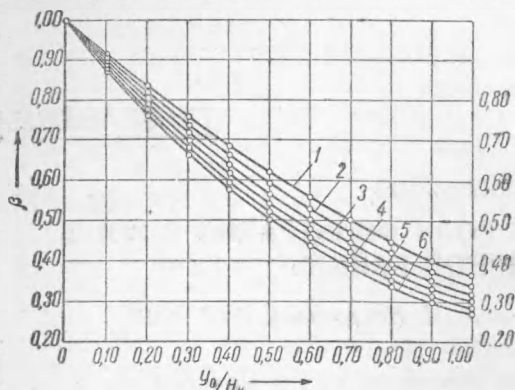


Рис. 1. График для определения расхода капиллярной зоны. 1 — $w_0/w_1 = 0$; 2 — $w_0/w_1 = 0,1$; 3 — $w_0/w_1 = 0,2$; 4 — $w_0/w_1 = 0,3$; 5 — $w_0/w_1 = 0,4$; 6 — $w_0/w_1 = 0,5$

$$w_y = w_1 \sqrt{1 - \frac{y}{H_k} \left[1 - \left(\frac{w_0}{w_1} \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

где w_1 , w_y , w_0 — влажности, соответственно: у поверхности грунтовых вод, на высоте y и при максимальной высоте капиллярного поднятия.

В сообщении (¹³) предложена зависимость капиллярной проницаемости k_w от влажности w в виде

$$k_w = k_{w_1} \left(\frac{w - w_0}{w_1 - w_0} \right)^{3,5}. \quad (4)$$

Используя (3) и (4) и интегрируя по (2), получим:

$$q_k = \frac{\Delta H}{L} k_{w_1} y_0 \beta, \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{4}{11} \frac{(1 - \bar{w}_0^2)(1 + \frac{2}{9}\bar{w}_0)}{(1 - \bar{w}^2)(1 + \bar{w}_0)} \left[1 - \frac{k_w(\bar{w} - \bar{w}_0)(\bar{w} + \frac{2}{9}\bar{w}_0)}{k_{w_1}(1 - \bar{w}_0)(1 + \frac{2}{9}\bar{w}_0)} \right] \quad (6)$$

при $\bar{w} = w/w_1$, $\bar{w}_0 = w_0/w_1$.

Учитывая (3), (4) и (6), мы видим, что β зависит только от отношения w_0/w_1 и y_0/H_k . Эта связь представлена на рис. 1.

При $y_0/H_k = 0$ $\beta = 1$; при $y_0/H_k = 1$ β определится формулой:

$$\beta_0 = \frac{4}{11} \frac{1 + \frac{2}{9}w_0/w_1}{1 + w_0/w_1}. \quad (7)$$

Суммарный расход потока грунтовых вод с учетом капиллярной зоны найдется как

$$Q = \frac{\Delta H}{L} k_{w_1} \bar{h}, \quad \bar{h} = h_{cp} + \beta y_0, \quad (8)$$

причем для $y_0 < H_k$ β находится по (6), а для $y_0 \geq H_k$ β_0 определяется по (7). В пределах наиболее часто встречающихся значений $0,1 < \omega_0/\omega_1 < 0,5$ значения $\beta_0 = 0,27 - 0,36$ или, округленно, $\beta_0 \approx 0,3$.

Проверкой правильности предлагаемого учета расхода, передвигающегося в „капиллярной кайме“, могут служить обычные лабораторные определения „коэффициента фильтрации“ грунта, проводящиеся для горизонтального потока грунтовых вод.

Приведем результаты некоторых наблюдений*. Опытный лоток имел ширину $B = 70$ см, длину „нетто“ $L = 298$ см. Высота насыпки грунта изменялась в пределах $T = 12 - 70$ см. Грунтом служил люберецкий песок с действующим диаметром, по Е. А. Замарину, $d_z = 0,16$ мм, высотой капиллярного поднятия $H_k \approx 35$ см, $\omega_0 = 0,035$, $\omega_1 = 0,350$, $m = 0,415$ (в долях от объема). При различных горизонтах H_1 верхнего бьефа и H_2 нижнего бьефа замерялся расход Q и вычислялся коэффициент водопроницаемости: по обычной формуле (1) и с учетом проводимости капиллярной зоны по формуле (8). В табл. 1 приводятся результаты наблюдений и вычисленные значения k_{w_1} .

Таблица 1

№ опыта	Измеренные величины				Вычисленные значения		
	T в см	H_1 в см	H_2 в см	Q в см ³ /сек.	k_{w_1} по (1)	k_{w_1} по (8)	% расхода капиллярной зоны
1	70,0	64,5	55,5	3,79	0,0299	0,0265	11,2
2	70,0	63,2	55,5	3,23	0,0300	0,0266	11,5
3	70,0	63,7	55,6	3,12	0,0275	0,0244	11,3
4	70,0	63,8	40,8	8,24	0,0292	0,0244	16,6
5	70,0	63,4	34,4	10,38	0,0312	0,0254	18,5
6	70,0	61,2	34,6	9,93	0,0331	0,0269	19,0
7	70,0	64,3	56,0	3,12	0,0266	0,0237	11,0
8	70,0	63,8	55,7	2,98	0,0262	0,0232	11,3
9	70,0	63,9	54,7	3,42	0,0267	0,0236	11,8
10	37,0	28,9	23,9	0,861	0,0278	0,0215	22,6
11	37,0	28,9	26,7	0,436	0,0303	0,0242	20,1
12	37,0	27,0	23,7	0,589	0,0299	0,0227	24,4
13	37,0	10,3	5,5	0,665	0,0747	0,0299	59,8
14	37,0	10,3	8,2	0,281	0,0616	0,0272	55,8
15	37,0	10,3	9,0	0,190	0,0645	0,0291	54,8
16	12,0	6,6	0,9	0,340	0,0677	0,0246	63,8

Без учета расхода в капиллярной зоне среднее значение $k_{w_1} = 0,0386 \pm 0,0117$; с учетом расхода в капиллярной зоне $k_{w_1} = 0,0252 \pm 0,0016$.

Отсюда видим, что вероятная ошибка среднего при учете расхода в капиллярной зоне снизилась в 5 раз, достигнув $6,1\%$, что имеет порядок точности измерений расходов. Если без учета расхода в капиллярной зоне отклонения величин k_{w_1} от среднего значения достигают $93,6\%$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 44,9\%$, то с учетом расхода капиллярной каймы отдельные отклонения не превышают $18,4\%$ при $\sigma = 9,1\%$.

* Работа проводилась в Московском гидромелиоративном институте М. И. Каплинским под руководством чл.-корр. АН СССР А. Н. Костякова и автора при участии Б. М. Живовой.

Учитывая, что испытания проводились в широких пределах изменений y_0/H_k (от 0,24 до 0,83) и процента расхода капиллярной зоны от 11 до 63,8%, можно считать, что приближенная связь (8) удовлетворительно отражает опытные данные.

Резюмируем полученные результаты.

1. Расход, проводимый капиллярной зоной в форме „каймы“, при плавном изменяющемся по длине потоке грунтовых вод может иногда играть существенную роль в общем расходе потока грунтовых вод. Считая заметным 5% капиллярного расхода, можно грубо приближенно (принимая $\beta_0 \approx 0,3$) принять, что движение в капиллярной зоне целесообразно учитывать только в том случае, если средняя глубина потока грунтовых вод превышает более чем в 6 раз максимальную высоту капиллярного поднятия. Эти средние глубины грунтовых вод могут быть весьма грубо охарактеризованы следующими величинами: песчаные грунты 3—6 м, суглинистые 6—12 м, глинистые 12—24 м. Если глубина грунтовых вод меньше приведенных величин, то участие капиллярного движения существенно отразится на общем расходе грунтовых вод. Отсюда видно, что для многих случаев расчета грунтовых вод (фильтрация через плотины и др.) учет капиллярного потока необходим.

2. Учет расхода в свободной „капиллярной кайме“ включением ее в зону движения с принятием проницаемости, равной проницаемости насыщенного грунта, может преувеличить значение капиллярной зоны примерно до 3 раз ($\beta_0 \approx 0,3$).

3. В случае „подпертой капиллярной каймы“ осредненная проницаемость ненасыщенной зоны тем ближе к проницаемости зоны полного насыщения, чем меньше высота подпертой каймы (см. значения β на рис. 1 для малых y_0/H_k) и в каждом конкретном случае может быть приближенно определена по (8) и рис. 1.

4. Наибольшие ошибки в определении величины фильтрационного расхода могут быть внесены при расчете регулирующих элементов мелиоративных систем (оросители, борозды, систематические дрены) ввиду большого в этом случае отношения высоты капиллярного поднятия к действующему напору; ошибки в этом случае могут достигать сотен процентов как в сторону преуменьшения расхода в случае неучета расхода в капиллярной зоне, так и в сторону преувеличения его при принятии проницаемости капиллярной зоны равной проницаемости зоны грунтовых вод.

Московский гидромелиоративный институт
им. В. Р. Вильямса

Поступило
18 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Е. Жуковский. Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод, Полн. собр. соч., 7, 1937, стр. 14. ² Н. Е. Жуковский. О влиянии давления на насыщенные водой пески, Полн. собр. соч., 7, 1937, стр. 34—40. ³ Н. Е. Жуковский, Просачивание воды через плотины, Полн. собр. соч., 7, 1937, стр. 330. ⁴ В. В. Ведерников, Гидр. строит., 5 (1935). ⁵ В. В. Ведерников, ДАН, 28, № 5 (1940). ⁶ В. В. Ведерников, Изв. АН СССР, ОТН, 8 (1947). ⁷ Н. Н. Веригин, ДАН, 66, № 4 (1949). ⁸ П. Я. Полубаринова-Кочина, Некоторые задачи плоского движения грунтовых вод, М.—Л., 1942, стр. 12. ⁹ С. А. Христианович, С. Г. Михлин и Б. Б. Дэвисон, Некоторые новые вопросы механики сплошной среды, М.—Л., 1938, стр. 227. ¹⁰ Ф. Б. Нельсон-Скорняков, Фильтрация в однородной среде, М., 1947, стр. 26. ¹¹ А. Ф. Лебедев, Почвенные и грунтовые воды, М., 1936. ¹² В. А. Ковда, Происхождение и режим засоления почв, 1, 1946, стр. 415—450. ¹³ С. Ф. Аверьянов, ДАН, 69, № 2 (1949).