Итак, если интенсивность потока в слое меньше некоторого значения ($\alpha < 3$), в нем при неравномерном нагреве сверху возникают замкнутые конвективные структуры с движением по часовой стрелке, заключенные между линией (10) и нижней границей слоя. При $\alpha < 1$ возникают ячейки с движением против часовой стрелки, заключенные между линиями (9) и верхней границей. Внешний поток обтекает ячейки обоих типов.

Образование замкнутых структур (застойных зон) может существенно повлиять на массообмен в некоторых технологических процессах. Возможно, такие зоны существуют в стекловаренной печи [3].

Хотя рассмотренное относилось в основном к случаю $k \ll 1$, главные особенности картины течения сохраняются при произвольных k. Можно написать аналоги уравнений (7) — (10) для общего случая, которые нужно решать численно. При этом появится зависимость критических значений α от k.

Не является существенным выбор граничных значений для температуры на нижней границе (можно вместо (1) взять $T = \text{const}$ или условия третьего рода). Можно также взять верхнюю границу слоя твердой. Хотя вид функций при этом изменится, деление потока на зоны остается.

Опыт численного решения полных уравнений для случая свободной конвекции при нагреве сверху свидетельствует о том, что основные особенности структуры течения, определяемые формой температурной кривой на верхней границе, сохраняются в широком интервале чисел Грасгофа [2]. Есть основания ожидать того же самого и для рассмотренного случая смешанной конвекции.

Поступила 9 I 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. **Allen D. W. et al.** Convection in the earth mantle.— In: Mantles of the Earth and Terrestrial Planets. L., Wiley, 1967.
2. **Лыков А. В., Берковский Б. М.** Конвекция и тепловые волны. М., «Энергия», 1974.
3. **Mase H., Sasagawa Y.** Mathematical modeling of glass tank furnace. Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., 1973, vol. 23, N 2.

УДК 551.491—624.131

ПРОМАЧИВАНИЕ ПОЧВ И ГРУНТОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Н. Н. Веригин, С. В. Васильев

(*Москва*)

При поливах и промывках с.-х. земель посредством дождевания на поверхность почвы подается постоянный удельный расход воды q. Подобные условия имеются также при наполнении наливных водоемов и водохранилищ.

Рассмотрим промачивание почв и грунтов зоны аэрации при $q > k$ (k — коэффициент фильтрации грунта). В этом случае область промачивания грунта состоит из двух зон: полного насыщения, где давление $p > 0$ (гравитационная зона), и неполного насыщения, где давление $p < 0$ (капиллярная зона). При этом на поверхности грунта появляется слой воды, высота которого со временем увеличивается. Подобная задача для одного частного случая рассмотрена в работе [1].

Для решения таких задач существует два подхода:

1. По теории В. В. Ведерникова в зоне отрицательного давления (капиллярная зона) пренебрегается содержанием воздуха, а на фронте промачивания принимается капиллярное давление $p_к = -\gamma H_к$. Тогда при $q > k$ в почве возникают зоны с положительным и отрицательным давлением, фильтрация в которых описывается уравнением Лапласа.

2. В зоне неполного насыщения принимается нелинейное уравнение Клюта — Ричардса. В этом случае необходимо совместное рассмотрение двух зон, для одной из которых справедливо уравнение Лапласа, а для другой — уравнение Клюта.

Согласно теории В. В. Ведерникова, предполагалось, что при подаче воды с интенсивностью $q \geqslant k$ на поверхности почвы сразу же исчезает капиллярный вакуум и появляется слой воды высотой $H(t)$.

Однако это допущение приводит к отрицательному давлению на поверхности почвы, залитой слоем воды, что невозможно. Это противоречие легко устраняется, если принять, что слой воды на поверхности земли возникает лишь по прошествии некоторого времени t_1 после начала дождевания, как это наблюдается и в экспериментах. Тогда процесс впитывания воды в почву будет происходить в две стадии. В первую стадию слой воды на поверхности почвы отсутствует, а капиллярный вакуум здесь уменьшается от $H_к$ до 0. Во вторую стадию на поверхности почвы появляется слой воды, высота которого со временем увеличивается.

Ниже приводится исследование впитывания воды в почву при допущении о мгновенном исчезновении на поверхности земли капиллярного вакуума $H_к$ и без такого допущения. В период фильтрации без подпора, когда фильтрационные воды еще не достигли уровня грунтовых вод, для любого момента времени t имеем балансное соотношение

$$qt = H(t) + \mu l(t) \qquad (q > k), \tag{1}$$

где l — глубина промачивания грунта; μ — дефицит его насыщения; $q = q_0 - \varepsilon$ — разность между подаваемым расходом q_0 и испарением ε.

Дифференциальное уравнение для скорости промачивания записывается в виде

$$\mu dl/dt = k[H(t) + l + H_к]/l. \tag{2}$$

Согласно (1), (2), в работе [2], получено соотношение

$$\left[1 - \frac{l}{A_1 H_к (1+\bar t)}\right]^{0,5+\alpha} \left[1 - \frac{l}{A_2 H_к (1+\bar t)}\right]^{0,5-\alpha} = \frac{1}{1+\bar t}, \tag{3}$$

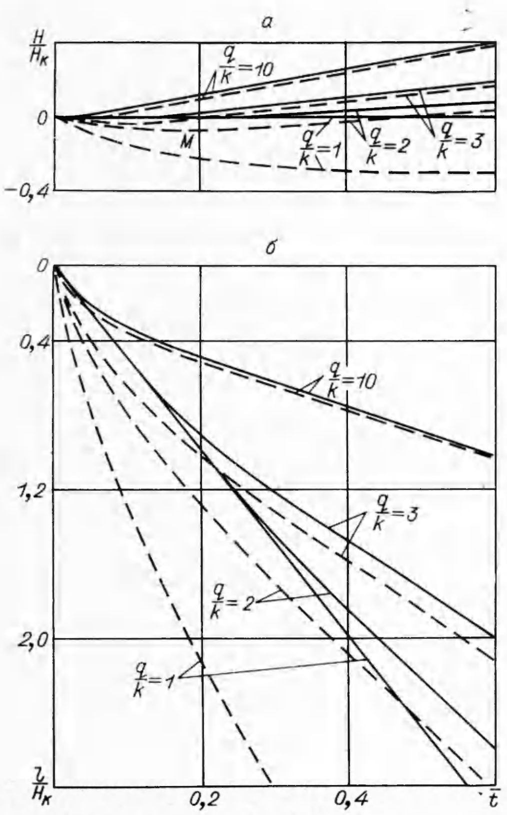
где

$$A_{1,2} = 0,5(k/q)(1/\mu - 1)(\alpha_0 \pm 1); \ \alpha_0 = \sqrt{1+\lambda}; \ \alpha = 0,5/\alpha_0;$$

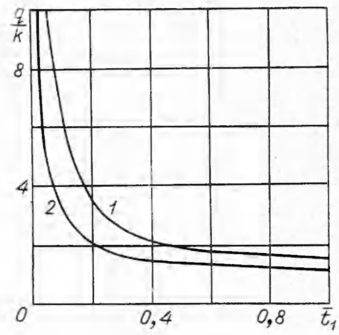
$$\lambda = 4(q/k)\mu/(1-\mu)^2; \ \bar t = qt/H_к$$

(в выражении A индексу 1 соответствует знак плюс, а индексу 2 — минус). Значения коэффициентов α и $A_{1,2}$ для $\mu = 0,2$ приводятся в таблице.

q/k	1	2	3	4	6	8	10	12	14	15
α	0,333	0,267	0,229	0,204	0,172	0,151	0,136	0,125	0,116	0,112
A_1	5,00	2,87	2,13	1,75	1,30	1,08	0,93	0,83	0,76	0,72
A_2	1,00	0,87	0,78	0,72	0,63	0,58	0,53	0,50	0,47	0,46



Фиг. 1



Фиг. 2

При $H_к = 0$ из (3) вытекает частное решение в виде $l = A_1 qt$.

По уравнению (3) построены кривые зависимости $l/H_к = f_1(q/k, \bar{t})$ при $\mu = 0{,}2$ (фиг. 1,*а*, штриховые линии). С помощью этих кривых и уравнения (1) построены зависимости глубины воды на поверхности почвы от времени $H/H_к = f_2(q/k, \bar{t})$ (фиг. 1, *б*, штриховые линии). Из поведения этих кривых видно, что в течение некоторого промежутка времени t_0 глубина воды на поверхности земли $H < 0$ и только при $t > t_0$ величины H становятся положительными. Для $q/k = 1$ решение (3) дает отрицательные значения глубины H при любом $t(t_0 = \infty)$. Отрицательные значения H невозможны, и поэтому совместное решение (1), (3) дает более или менее правильный результат лишь при $t \geqslant t_0$.

Зависимость $\bar{t}_0 = qt_0/H_к$ от q/k при $\mu = 0{,}2$ показана на фиг. 2 (кривая *1*).

Величины t_0 и l_0, соответствующие точке $H = 0$ на фиг. 1, определяются из совместного решения уравнений (1), (3) при $H = 0$.

Дифференцируя (1) по t, принимая $dH/dt = 0$ и подставляя в (1) значение dl/dt из (2), получим

$$\frac{H_M}{H_к} = \frac{(q-k)\,\bar{t}_M - \mu k}{q - k(1-\mu)}, \quad \bar{t}_M = \frac{qt_M}{H_к}. \tag{4}$$

Из совместного решения уравнений (1), (3) и (4) находятся значения t_M, l_M и H_M в точке M, соответствующей минимуму H (см. фиг. 1). Из (4) при $H_M = 0$ и $t_M = t_0$ находится $q/k = f(\mu, H_к)$, при котором решение (3) справедливо для любых значений времени t (в этом случае отрицательные глубины H отсутствуют).

Чтобы при малых t величина H всегда была положительной или равной нулю, необходима иная постановка задачи [3, 4].

Пусть в течение периода времени $0 < t < t_1$ весь подаваемый расход воды q идет на промачивание грунтов, и поэтому вода на поверхности почвы отсутствует ($H = 0$). В начальный момент времени $t = 0$ на фронте промачивания и на поверхности земли сразу же возникает вакуум $H_к$. При этом вследствие нарушения капиллярных менисков на поверхности земли при дождевании этот вакуум за время t_1 уменьшается от $H_к$ до 0. На фронте промачивания вакуум будем считать постоянным $H_к = \mathrm{const}$.

Тогда для этого периода краевые условия задачи будут следующими: 1) давление на фронте промачивания $p(l, t) = -\gamma H_к = \mathrm{const}$; 2) расход воды $q = -k\partial h(x, t)/\partial x = \mathrm{const}$.

Расход q постоянен при любых x и t, так как для рассматриваемого здесь жесткого режима одномерной фильтрации он вообще является функцией только от t, а при дождевании с постоянной интенсивностью не зависит от t.

Задание расхода $q = \mathrm{const}$ и напора на фронте промачивания обеспечивает единственность решения задачи. Тогда высота капиллярного вакуума на поверхности почвы $h_к$ будет зависеть от t, уменьшаясь до нуля от своего максимального значения $H_к$.

Из (1), (2) при $H = 0$ имеем

$$\mu dl/dt = k(-h_к + l + H_к)/l,\quad qt = \mu l, \tag{5}$$

где $h_к$ — капиллярный вакуум на поверхности земли.

Совместное решение уравнений (5) при условии $t = 0$, $l = 0$, $h_к = H_к$ дает зависимость глубины промачивания и глубины капиллярного вакуума от времени в виде

$$l = qt/\mu,\quad h_к = H_к - (qt/\mu)(q/k - 1). \tag{6}$$

Продолжительность периода t_1 и глубину промачивания к концу этого периода l_1 находим из уравнений (6) при условиях $t=t_1$, $l=l_1$, $h_к=0$. Имеем

$$t_1 = \mu H_к k/q(q - k),\quad l_1 = kH_к/(q - k). \tag{7}$$

График $qt_1/H_к = \varphi(q/k)$ при $\mu = 0{,}2$ дан на фиг. 2 (кривая *2*).

Для последующего периода $t > t_1$ из (1) подставляем H в (2) и интегрируем это уравнение в пределах от l, t до l_1, t_1, что дает

$$\left[\frac{A_1H_к(1+\bar{t})-l}{A_1H_к(1+\bar{t}_1)-l_1}\right]^{0,5+\alpha} = \left[\frac{A_2H_к(1+\bar{t}_1)+l_1}{A_2H_к(1+\bar{t})+l}\right]^{0,5-\alpha},\quad \bar{t}_1 = \frac{qt_1}{H_к}. \tag{8}$$

На фиг. 1, *а* сплошными линиями показаны зависимости $l/H_к = \varphi_1(\bar{t}, q/k)$ и на фиг. 1, *б* — зависимости $H/H_к = \varphi_2(\bar{t}, q/k)$, построенные по уравнениям (1), (8) при $\mu = 0{,}2$.

Сопоставление решения (3) (см. фиг. 1, штриховые линии) с полученными результатами (7), (8) (см. фиг. 1, сплошные линии) показывает, что по (3) получается большая глубина промачивания l и меньшая высота слоя воды над поверхностью земли H. Максимальное различие в результатах расчетов по (3) и (8) имеет место при $q/k = 1{,}0$. С увеличением отношения q/k и времени t это различие уменьшается и при $q/k \geqslant 10$ не превышает 10%.

Поступила 15 IV 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веригин Н. Н., Дзекцер Е. С., Тынчерова Э.** Одномерная фильтрация при наличии зон полного и частичного насыщения грунта водой.— В сб.: Инженерные изыскания в строительстве, № 2(20). М., Изд. ЦИНИС Госстроя СССР, 1973.
2. **Полубаринова-Кочина П. Я.** Теория движения грунтовых вод. М., ГИТТЛ, 1952.
3. **Асланов Г. К.** Нестационарная фильтрация воды в грунтах при оросительных поливах и промывании засоленных почв без дренажа.— «Изв. высш. учеб. заведений. Геология и разведка», 1970, № 4.
4. **Чжао Пей-ю.** Особенности проектирования и возведения плотин из лесса и лессовидных грунтов. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1955.

УДК 624.131.6 : 532.72

РАССОЛЕНИЕ «ВЛАЖНЫХ» ГРУНТОВ

В. И. Пеньковский

(*Новосибирск*)

В зоне аэрации грунтов, обладающих большой водоудерживающей способностью, подавляющая часть солей находится в норовом растворе, связанном со скелетом грунта. Как известно [1], вода в почве становится неподвижной при влажностях, не превышающих так называемую «наименьшую полевую влагоемкость», или «влажность разрыва капилляров», при которой нарушается связность пространства, занятого жидкой фазой. В этих условиях конвективно-диффузионный солеобмен между отдельными слоями почвы пренебрежимо мал либо отсутствует вовсе, благодаря чему кривые распределения солей могут (как это часто наблюдается на практике) в течение длительного времени сохранять свою форму.

С началом промывки связность пространства, занятого жидкостью, в зоне промачивания восстанавливается, и под воздействием конвекции и фильтрационной диффузии происходит процесс перераспределения солей.

Пусть m_2 — объемная «влажность разрыва капилляров», m_1 — количество влаги, способной передвигаться под действием силы тяжести. При промывке почвы дождеванием с интенсивностью $v < k$, где k — коэффициент фильтрации грунта, величину m_1 можно оценить, например, применяя формулу для расхода воды при движении с неполным насыщением пор [2],

$$m_1 = (m - m_2)(v/k)^{1/n},$$

где m — пористость грунта; $n \approx 3,5$ — эмпирическая константа. В условиях промывки с затоплением поверхности почвы $v \geqslant k$, а величина $m_1 = m - m_2$ по физическому смыслу идентична коэффициенту недостатка насыщения (или коэффициенту водоотдачи).

Ниже рассматривается вопрос о перераспределении солей в зоне промачивания почвы на начальной стадии промывки (с момента подачи промывной воды и образования подвижного фронта промачивания $x = x_0(t)$) и заключительной стадии (когда с прекращением подачи воды образуется погружающаяся в глубь почвы свободная поверхность $x = x_1(t)$ грунтовых