

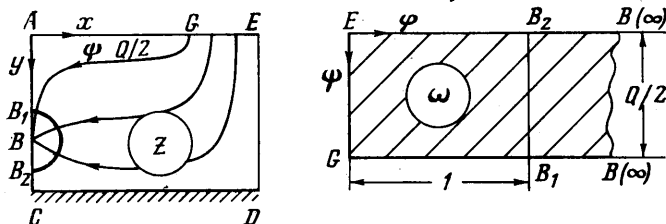
НЕКОТОРЫЕ ПРИБЛИЖЕННЫЕ МОДЕЛИ СОЛЕПЕРЕНОСА  
ПРИ ПРОМЫВКАХ ПОЧВ С ВОДУПОРОМ

М. Л. ФРЕНКЕЛЬ

(Новосибирск)

На базе приближенной двумерной модели фильтрации при дренажных промывках почвенного слоя с непроницаемым основанием [1], схематично представленной на фиг. 1, исследуется процесс рассоления почв для нескольких форм уравнения солеобмена между движущимся раствором и неподвижной фазой. Пренебрежение внешней диффузией позволяет свести исследование к решению одномерных краевых задач, характеризующих солеперенос вдоль фиксированных линий тока. Аналогичные задачи рассматривались в [2] применительно к одномерной фильтрации промывных вод в сухой грунт.

1. Рассмотрим вначале схему так называемой гетерогенной пористой среды. В этой модели поровое пространство подразделяется на транзитные и тупиковые поры; доля их объема обозначена соответственно через  $m_1$  и  $m_2$ . Для концентраций  $c(x, y, t)$  и  $n(x, y, t)$  раствора в транзитных и ту-



Фиг. 1

пиковых порах имеем следующую систему уравнений и условий:

$$(1.1) \quad m_1 c_t = -(\bar{w}, \text{grad } c) - m_2 n_t, \quad n_t = \gamma(c - n)$$

$$(1.2) \quad c(x, y, 0) = c_0(x, y), \quad n(x, y, 0) = n_0(x, y)$$

$$c(x, y, t)|_{GE} = c_0(x, y)|_{GE} = 0$$

Вектор  $\bar{w}$  скорости фильтрации в (1.1) берется из решения фильтрационной задачи. В соответствии с [1] динамика солей изучается здесь на фоне установившегося фильтрационного течения. Поэтому для всех рассматриваемых здесь задач в начальных данных следует каким-то образом учесть те изменения в исходной (естественной) картине распределения солей, которые могли произойти с момента подачи промывных вод до момента, начиная с которого поток грунтовых вод можно описать (возможно, с некоторым приближением) вышеупомянутой моделью. Так, на стадии свободной одномерной фильтрации до смыкания промывных вод с грунтовыми можно использовать решения, представленные в [2].

Введем в рассмотрение область комплексного потенциала  $\omega = \varphi + i\psi$  (фиг. 1). Переходя от переменных  $x, y$  к переменным  $\varphi, \psi$  [3] и учитывая, что  $\varphi = 0$  вдоль  $GE$ , преобразуем (1.1), (1.2) к виду

$$(1.3) \quad \begin{aligned} m_1 c_i &= -|w|^2 c_\varphi - m_2 n_i, \quad n_i = \gamma(c - n) \\ c(\varphi, \psi, 0) &= c_0(\varphi, \psi), \quad n(\varphi, \psi, 0) = n_0(\varphi, \psi), \quad c(0, \psi, t) = 0 \end{aligned}$$

Здесь  $\psi$  играет роль параметра ( $0 \leq \psi \leq Q/2$ ,  $Q$  — расход), и, таким образом, в области  $\omega$  задача становится одномерной.

Сделаем далее замену

$$(1.4) \quad u(\varphi, \psi) = m_1 \int_0^\varphi |w(\lambda, \psi)|^{-2} d\lambda$$

Нетрудно уяснить физический смысл переменной  $u$ .

Рассмотрим для этого дифференциальное уравнение движения частицы по транзитным порам в комплексной форме  $m_1 (dz/dt) = \bar{w}$ , где  $\bar{w}$  — физическая скорость фильтрации. Учитывая, что в стационарном фильтрационном потоке  $\psi = \text{const}$  вдоль траектории движения частицы, можно представить предыдущее уравнение в виде

$$m_1 (d\varphi/dt) = \bar{w} (d\omega/dz) = |w|^2$$

Интегрируя его при условии  $\varphi|_{t=0} = 0$ , имеем

$$t(\varphi, \psi) = m_1 \int_0^\varphi |w(\lambda, \psi)|^{-2} d\lambda = u(\varphi, \psi)$$

Функция  $u(\varphi, \psi)$  выражает время прохождения жидкой частицы по некоторой (с выбранным значением  $\psi$ ) линии тока от источника ( $\varphi = 0$ ) до эквипотенциала со значением потенциала, равным  $\varphi$ , причем  $0 \leq u \leq T(\psi)$ , где  $T(\psi)$  — полное время движения частицы до попадания в дренаж. В связи с этим можно заметить, что в области  $(u, \psi)$  положение фронта прорывной воды в момент  $t$  определяется равенством  $u = t$ .

В переменных  $u, t$  задача (1.3) формулируется следующим образом:

$$(1.5) \quad \begin{aligned} c_i &= -c_u - \kappa n_i, \quad n_i = \gamma(c - n), \quad \kappa = m_1/m_2 \\ c(u, 0) &= c_0(u), \quad n(u, 0) = n_0(u), \quad c(0, t) = 0 \end{aligned}$$

Применяя к системе (1.5) преобразование Лапласа, получим с учетом начальных условий следующую задачу для изображений:

$$\begin{aligned} C(u, p) &= L(c(u, t)), \quad N(u, p) = L(n(u, t)) \\ pC - c_0(u) &= -C_u - p\kappa N + \kappa n_0(u), \quad pN - n_0(u) = \gamma(C - N), \quad C(0) = 0 \end{aligned}$$

Первое уравнение этой системы превращается после исключения  $C$  с помощью второго уравнения в обыкновенное. Решая его, найдем

$$(1.6) \quad \begin{aligned} N(u, p) &= \frac{n_0(u)}{p + \gamma} + \int_0^u \left[ c_0(\xi) \frac{\gamma}{p + \gamma} + \frac{\kappa \gamma^2}{(p + \gamma)^2} n_0(\xi) \right] \times \\ &\times \exp \left[ -p \left( \frac{\gamma \kappa}{p + \gamma} + 1 \right) (u - \xi) \right] d\xi \end{aligned}$$

В результате перехода к формуле (1.6) к оригиналу с использованием известных [4] свойств преобразования Лапласа и формулы 6.561.7 из [5]

получим

$$\begin{aligned}
 n(u, t) &= e^{-\gamma t} \left\{ n_0(u) + \sigma \int_r^u e^{\delta \eta} \times \right. \\
 &\times \left[ n_0(\tau) I_1(2\sigma\theta) \frac{\theta}{\eta} + \kappa^{-1} c_0(\tau) I_0(2\sigma\theta) \right] d\tau \left. \right\} \\
 c(u, t) &= e^{-\gamma t} \left\{ \chi(u-t) c_0(u-t) e^{\delta t} + \right. \\
 (1.7) \quad &+ \sigma \int_r^u e^{\delta \eta} \left[ c_0(\tau) I_1(2\sigma\theta) \frac{\eta}{\theta} + \kappa n_0(\tau) I_0(2\sigma\theta) \right] d\tau \left. \right\} \\
 &(r = (u-t)\chi(u-t), \eta = u-\tau, \theta = \sqrt{\eta(t-\eta)}, \sigma = \gamma\kappa^{1/2}, \delta = \gamma(1-\kappa))
 \end{aligned}$$

Здесь  $\chi$  — функция Хэвисайда,  $I_0, I_1$  — функции Бесселя.

В случае отсутствия солеобмена ( $\gamma=0$ ) решение (1.7) принимает вид

$$c(u, t) = \chi(u-t) c_0(u-t), \quad n(u, t) = n_0(u)$$

При указанной выше физической трактовке переменной  $u$  последние уравнения выражают «поршневой» характер вытеснения раствора из транзитных пор и постоянство концентрации — в тупиковых.

2. Если обмен между связанными солями и движущимся раствором имеет недиффузионный характер, уравнения баланса солей часто записывают в виде [6]

$$\begin{aligned}
 mc_t &= -(\bar{w}, \text{grad } c) - mn_t \\
 n_t &= -\gamma_0(c_* - c)n^2 \\
 (n > 0, 0 \leq c \leq c_*)
 \end{aligned}
 \quad (2.1)$$

$$c(x, y, 0) = c_0(x, y)$$

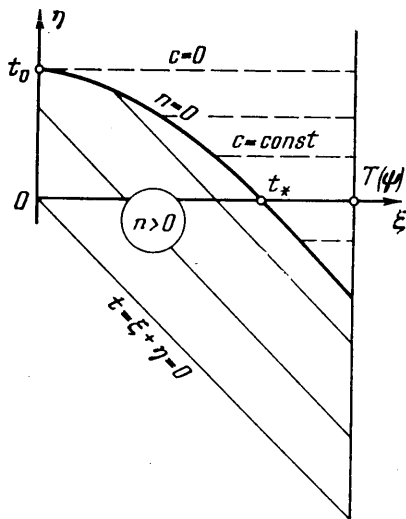
$$n(x, y, 0) = n_0(x, y)$$

$$c(x, y, t) |_{GE} = c_{00}(t)$$

Здесь  $c(x, y, t), n(x, y, t)$  — соответственно количество движущихся и связанных солей в единице порового пространства,  $c_*$  — концентрация предельного насыщения.

Приведем уравнения (2.1) к безразмерному виду, относя величины  $c$  и  $n$  к  $c_*$ . Рассматривая далее (2.1) применительно к вышеупомянутой фильтрационной задаче и преобразуя аналогично предыдущему пространственные переменные, получим, сохраняя за безразмерными величинами прежние обозначения

$$\begin{aligned}
 (2.2) \quad c_t &= -c_u - n_t, \quad n_t = -\gamma(1-c)n^2 \quad (0 \leq u \leq T(\psi), t \geq 0) \\
 c(u, 0) &= c_0(u), \quad n(u, 0) = n_0(u), \quad c(0, t) = c_{00}(t)
 \end{aligned}$$



Фиг. 2

Переходя к переменным  $\xi = u, \eta = t - u$  (фиг. 2), представим (2.2) в виде

$$(2.3) \quad \begin{aligned} c_{\xi} &= -n_{\eta}, & n_{\eta} &= -\gamma(1-c)n^{\alpha} \quad (0 \leq \xi \leq T(\psi), \quad \eta \geq -\xi) \\ c|_{\xi=-\eta} &= c_0(\xi), & n|_{\xi=-\eta} &= n_0(\xi), \quad c(0, \eta) = c_{00}(\eta) \end{aligned}$$

Прежде чем построить решение задачи (2.3) для отдельных значений  $\alpha$ , выскажем некоторые общие замечания о характере исследуемого процесса, считая пока  $\alpha \neq 1$  (случай  $\alpha = 1$  будет рассмотрен особо).

Исключая в первом уравнении (2.3) величину  $n_{\eta}$  с помощью второго уравнения и интегрируя по  $\xi$ , получим

$$(2.4) \quad \begin{aligned} c(\xi, \eta) &= 1 - [1 - c_0(-\eta)\chi(-\eta) - c_{00}(\eta)\chi(\eta)] \times \\ &\times \exp \left[ -\gamma \int_{\eta}^{\xi} n^{\alpha}(\lambda, \eta) d\lambda \right] \quad (r = -\eta\chi(-\eta)) \end{aligned}$$

Далее имеем из второго уравнения (2.2)

$$(2.5) \quad n^{1-\alpha}(u, t) = n_0^{1-\alpha}(u) - \gamma(1-\alpha) \int_0^t [1 - c(u, \tau)] d\tau$$

Согласно (2.4) и (2.5) можем записать с учетом (2.3)

$$(2.6) \quad 0 < c(\xi, \eta) < 1 - \delta(\psi), \quad \delta(\psi) = (1 - c_0^*) \exp[-\gamma T(\psi)(n_0^*)^{\alpha}] \\ (0 < \delta < 1)$$

Здесь  $c_0^* = \max(c_0, c_{00}), n_0^* = \max(n_0)$ .

Используя (2.6), получим на основании (2.5)

$$\begin{aligned} [n_0^{1-\alpha}(u) - \gamma(1-\alpha)t]^{1/(1-\alpha)} &< n(u, t) < \\ < [n_0^{1-\alpha}(u) - \gamma(1-\alpha)t\delta(\psi)]^{1/(1-\alpha)} \end{aligned}$$

Отсюда следует, что если в рассматриваемой начальной точке в начальный момент процесса находились соли в связанном состоянии ( $n_0(u, \psi) > 0$ ), то при  $\alpha > 1$  некоторое их количество остается в этой точке в любой момент, тогда как при  $\alpha < 1$  они целиком вымываются за конечный промежуток времени; в последнем случае переменные  $t$  и  $\eta$  изменяются в ограниченном интервале.

Пользуясь равенствами (2.4) и (2.5), можно показать, что если вдоль рассматриваемой линии тока концентрации  $c(u)$  и  $n(u)$  являются неубывающими функциями переменной  $u$  при  $t=0$ , то этим же свойством они обладают и в любой последующий момент.

Обратимся к решению задачи (2.3). В первом уравнении (2.3) исключим величину  $c(\xi, \eta)$  посредством второго и проинтегрируем его затем по  $\eta$ ; в результате получим

$$(2.7) \quad (n^{1-\alpha})_{\xi} + \gamma(1-\alpha)n + \varphi(\xi, \alpha) = 0$$

Функцию  $\varphi(\xi, \alpha)$ , не зависящую от  $\eta$ , можно найти, полагая в (2.7)  $\eta = -\xi$  ( $t=0$ ) и используя второе уравнение (2.2) (штрихом будем обозначать дифференцирование функции одной переменной)

$$(2.8) \quad \begin{aligned} \varphi(\xi, \alpha) &= -[(n^{1-\alpha})_u + (n^{1-\alpha})_t]|_{t=0} - \gamma(1-\alpha)n_0(\xi) = \\ &= (1-\alpha) \{ \gamma[1 - c_0(\xi) - n_0(\xi)] - n_0^{-\alpha}(\xi)n_0'(\xi) \} \end{aligned}$$

Функция  $n$  в (2.7) должна удовлетворять следующему краевому условию (фиг. 2):

$$(2.9) \quad n^{1-\alpha}|_{\Gamma} = n_0^{1-\alpha}(r) - \gamma(1-\alpha) \int_0^R [1-c_{00}(\tau)] d\tau$$

$$(r = -\eta\chi(-\eta), \quad R = \eta\chi(\eta))$$

При  $\eta > 0$ , т. е. за фронтом промывной воды, представление (2.9) для  $n_{\Gamma}$  получается интегрированием второго уравнения (2.3) при  $\xi = 0$  с учетом последнего условия (2.2); при  $\eta < 0$  значение  $n_{\Gamma}$  представляет собой начальное значение (2.2) функции  $n$ .

После нахождения  $n(\xi, \eta)$  из (2.7) функция  $c(\xi, \eta)$  определится с помощью второго уравнения (2.3).

Остановимся теперь на нескольких частных случаях.

а)  $\alpha = 0$ . Имеем модель так называемого пленочного или поверхностного засоления [6]. Уравнение (2.7) линейное, его решение имеет вид

$$(2.10) \quad n(\xi, \eta) = e^{-\gamma(\xi-r)} \left[ n_{\Gamma} - \int_r^{\xi} \varphi(\lambda, 0) e^{\gamma(\lambda-r)} d\lambda \right]$$

Из (2.3) найдем с учетом (2.8) и (2.9)

$$(2.11) \quad c(\xi, \eta) = 1 - e^{-\gamma(\xi-r)} [1 - \chi(\eta) c_{00}(R) - \chi(-\eta) c_0(r)]$$

Из (2.11) следует, что если на входе в начальный момент существует разрыв между значениями концентрации промывных и грунтовых вод ( $c_{00} \neq c_0(0)$ ), то в дальнейшем он сохраняется при  $\eta = 0$  — на движущемся фронте промывной воды.

Полагая в (2.10)  $n = 0$ , получим соотношение

$$(2.12) \quad n_0(r) - \gamma \int_0^R [1 - c_{00}(\tau)] d\tau = \int_r^{\xi} \varphi(\lambda, 0) e^{\gamma(\lambda-r)} d\lambda$$

посредством которого в каждой точке рассматриваемой линии тока определяется время полного вымывания связанных солей.

Предположим, что  $c_0(x, y) = c_{00}(t) = \text{const}$ ,  $n_0(x, y) = \text{const}$ . Тогда выражения (2.10) и (2.11) с учетом (2.8), (2.9) представим в виде

$$(2.13) \quad n(\xi, \eta) = [1 - c_0 - \gamma R(1 - c_0)] \times \exp[-\gamma(\xi - r)] - (1 - c_0 - n_0)$$

$$(2.14) \quad c(\xi, \eta) = 1 - (1 - c_0) \exp[-\gamma(\xi - r)]$$

Уравнение (2.12) можно записать так:

$$(2.15) \quad \xi = A + (1/\gamma) \ln(1 - \gamma R) + r, \quad A = (1/\gamma) \ln[(1 - c_0)/(1 - c_0 - n_0)]$$

Схематично кривая (2.15) изображена на фиг. 2. В соответствии с (2.15) полное рассоление (по связанной фазе) наступает прежде всего при  $t_0 = \eta_0|_{\xi=0} = n_0/(1 - c_0)\gamma$  на полосе затопления. Далее фронт рассоления продвигается вглубь, догоняя при  $t_* = \xi|_{\eta=0} = A$  фронт промывной воды. В тот же момент рассоление заканчивается и в остальной части области, а процесс, описываемый задачей (2.2), должен рассматриваться, таким образом, при  $0 \leq t \leq t_*$ .

Так как  $\xi + \eta = t$ , то согласно уравнениям (2.13) и (2.14) концентрации  $c$  и  $n$  перед фронтом промывной воды, изменяясь со временем, остаются

постоянными по пространственным координатам и единственным фактором, определяющим здесь ход процесса, является солеобмен между подвижным и связанным раствором. Позади же фронта ( $\eta > 0$ ), в точках, где в рассматриваемый момент  $n > 0$ , в дополнение к солеобмену действует конвективный перенос. Интересно, что влияние обоих этих факторов на величину  $c$  в данном случае взаимно уравновешивается: согласно равенству (2.14) величина  $c(\xi, \eta)$  в некоторой фиксированной точке остается неизменной с момента прохождения через нее фронта промывной воды до полного поглощения связанных солей.

При  $n=0$  система (2.3) вырождается в уравнение  $c_\xi=0$ , т. е.  $c=g(\eta)$ . Функция  $g(\eta)$  определяется по кривой  $n$ ; в рассматриваемом случае, например, имеем в силу (2.13) и (2.14)

$$(2.16) \quad c(\xi, \eta) = (c_0 + n_0 - \gamma R) / (1 - \gamma R)$$

Согласно (1.4) соотношение  $\eta = \text{const}$  выполняется для жидкой частицы, движущейся в потоке со скоростью фильтрации, и зависимость (2.16) отражает, таким образом, перенос потоком растворенных солей (при отсутствии связанных). Как следует из (2.16), в точках, оказавшихся в момент исчезновения связанных солей перед фронтом промывной воды ( $\eta < 0$ ), концентрация  $c$  сохраняется неизменной до подхода фронта; позади же него происходит поршневое вытеснение минерализованных грунтовых вод промывными. Линия  $\eta = \eta_0$ , вдоль которой в силу (2.15)  $c = c_0$  (фиг. 2), определяет для каждой точки выбранной линии тока время  $t = \eta_0 + u$  полного рассоления. При  $\eta > \eta_0$  имеем  $c(\xi, \eta) = c_0 = \text{const}$ .

Заметим, что представление (2.15) имеет смысл, если  $c_0 + n_0 < 1$ . При этом с увеличением начального соле содержания возрастает величина  $A$ , выражающая согласно вышесказанному время  $t_*$  полного вымывания потоком связанных солей; вместе с тем расширяется зона  $\eta > 0$ , в пределах которой вымывание достигается с участием промывных вод. Если исходить непосредственно из (2.13), то в переменных  $u, t$  условие  $n=0$  запишется так:

$$n_0 = \begin{cases} (1 - c_0) [(1 - \exp(-\gamma u)) + \gamma(t - u) \exp(-\gamma u)], & t \geq u \\ (1 - c_0) \exp(-\gamma t), & t < u \end{cases}$$

Отсюда видно, что в рассматриваемом случае полное поглощение связанных солей промывными водами заведомо осуществляется за конечное время при любом их начальном содержании  $n_0$ . Между тем перед фронтом промывной воды, где насыщающаяся вода замещается столь же минерализованной, равенство  $n=0$  при конечном  $t$  возможно лишь в случае  $n_0 < 1 - c_0$ .

б)  $\alpha = 1/2$ . Засоление с кинетикой солеобмена, определяемой вторым уравнением (2.1) при указанном значении  $\alpha$ , называют дисперсным или объемным [6]. В этом случае уравнение (2.7) при произвольном начальном распределении концентраций является уравнением Риккати общего вида относительно величины  $\sqrt{n}$ . Если  $c_0(x, y), n_0(x, y), c_{00}(t)$  — константы, то оно превращается в уравнение с разделяющимися переменными. Решая последнее при условии (2.9) и находя далее  $c(\xi, \eta)$ , получим

$$(2.17) \quad \begin{aligned} n(\xi, \eta) &= (1 - c_0 - n_0) \operatorname{tg}^2(\theta - \beta) \\ c(\xi, \eta) &= 1 - [(1 - c_{00}) \chi(\eta) \cos^2 \theta - (1 - c_0 - n_0) \chi(-\eta)] / \cos^2(\theta - \beta) \\ \theta &= \operatorname{arc} \operatorname{tg} \{ [\sqrt{n_0} - (\gamma/2)(1 - c_{00})R] / \sqrt{1 - c_0 - n_0} \}, \\ \beta &= (\gamma/2)(\xi - r) \sqrt{1 - c_0 - n_0} \end{aligned}$$

В качественном отношении характер процесса, определяемый равенствами (2.17), тот же, что и в рассмотренном выше для  $\alpha=0$  случае постоян-

ных начальных концентраций; при этом вдоль линии  $n=0$  выполняется соотношение  $\theta=\beta$ .

в)  $\alpha=1$ . В этой модели с так называемой регулярной кинетикой сорбции коэффициенты  $\gamma_0$  в (2.1) принимают [2] пропорциональным величине скорости фильтрации:  $\gamma_0=a|w|$ . Заменяем здесь  $|w|$  величиной  $v$ , представляющей собой осредненную вдоль той или иной выбранной линии тока от ее начала ( $\varphi=0$ ) до рассматриваемой точки; при этом, переходя к переменным  $\varphi, \psi$  и учитывая использованные ранее соотношения, имеем

$$(2.18) \quad v(\varphi, \psi) = m \int_0^{t(\varphi, \psi)} |w| d\tau / t(\varphi, \psi) = \int_0^{\varphi} |w(\lambda, \psi)|^{-1} d\lambda / \int_0^{\varphi} |w(\lambda, \psi)|^{-2} d\lambda$$

По-прежнему исходя из (2.3), получим теперь вместо (2.7), (2.8)

$$(2.19) \quad n_{\xi} + \gamma(\xi^{\circ}) n^2 + \varphi(\xi) n = 0, \quad \gamma(\xi^{\circ}) = \gamma_0(\xi^{\circ}) c_* = a c_* v(\xi^{\circ})$$

$$(2.20) \quad n_r = n_0(r) \exp \left\{ -\gamma \int_0^R [1 - c_{00}(\tau)] d\tau \right\},$$

$$(\varphi(\xi) = \gamma(\xi^{\circ}) [1 - c_0(\xi) - n_0(\xi)] - [\ln n_0(\xi)]')$$

Здесь  $\xi^{\circ}$  — максимальное значение  $\xi$ , до которого в том или ином случае интегрируется уравнение (2.19).

При выбранном значении потенциала  $\varphi$  как пространственной независимой переменной величина  $\xi^{\circ}$  определяется из (1.4), а  $v(\xi^{\circ})$  предвычисляется посредством (2.18) и, следовательно, величина  $\gamma(\xi^{\circ})$  играет роль постоянной в уравнении (2.19). Последнее является уравнением Бернулли. Решая его при условии (2.20) и находя далее  $c(\xi, \eta)$ , имеем

$$(2.21) \quad \begin{aligned} n(\xi, \eta) &= n_0(\xi) q(\xi) / f(\xi, \eta) \\ c(\xi, \eta) &= 1 - [1 - \chi(-\eta) c_0(r) - \chi(\eta) c_{00}(R)] \times \\ &\times q(r) \exp \left[ \gamma \int_0^R (1 - c_{00}(\tau)) d\tau \right] / f(\xi, \eta) \end{aligned}$$

$$q(\lambda) = \exp \left\{ \gamma \int_0^{\lambda} c_0(\kappa) + n_0(\kappa) - 1 \right\} d\kappa$$

$$f(\xi, \eta) = \exp \left[ \gamma \int_0^R (1 - c_{00}(\tau)) d\tau \right] q(r) + \gamma \int_0^{\xi} n_0(\tau) q(\tau) d\tau$$

В отношении поведения величины  $n$  с ростом  $t$  рассматриваемый случай аналогичен случаю  $\alpha > 1$ , ибо, как следует из (2.21),  $n(u, t) > 0$  при любом конечном значении  $t$ ; если  $c_{00} = \text{const}$ , то для больших  $t$  согласно (2.27) можно записать

$$n(u, t) \approx n_0(u) q(u) \exp [-\gamma(1 - c_{00})t]$$

3. Иллюстрацией могут служить результаты расчетов вышеупомянутой фильтрационной задачи.

Выбраны следующие параметры: междренное расстояние  $L=5$ , глубина заложения дрены  $\beta=0.4$ , относительная длина незаопленной части поверхности  $l/L=0$  (фиг. 3, а) и  $l/L=0.9$  (фиг. 3, б). Для двух моментов безразмерного времени  $t^{\circ} = m_1 T^2 / (\chi H) t$ ,  $t$  — реальное время,  $H$  — действующий

напор,  $T$  — глубина залегания водоупора, к которой отнесены все геометрические величины (кривым 1–4 соответствуют значения  $t^0=3.2, 9.9, 2.9, 9.5$ ), приведены изолинии средневзвешенных концентраций для моделей гетерогенной среды (точечные линии —  $(m_1c+m_2n)/(m_1+m_2)=0.01, m_1=0.28, m_2=0.12, \gamma=1$ ) и регулярной кинетики солеотдачи (пунктир —  $c+n=0.01, m=0.4, \gamma_0=4$ ), сплошными линиями представлены положения фронта промывной воды в схеме поршневого вытеснения, которая является частным случаем рассмотренных выше моделей солепереноса при  $\gamma=0$ . Штрихпунктиром на фиг. 3, б изображена приближенная кривая депрессии [1].

Начальные концентрации задавались на равномерной прямоугольной сетке. Было принято  $c_0=n_0=0.5$  всюду в области фильтрации, кроме узкой полосы, прилегающей к поверхности, где величины  $c$  и  $n$  линейно (для согласования с граничным условием) убывают до нуля. Затем для каждого узла сетки по формуле (1.4) с использованием зависимости  $\omega(z)$  вычислялась координата  $u$ . Далее вдоль каждой расчетной линии тока проводился перерасчет (с интерполяцией) начальных данных с их фиксированием в точках, равноотстоящих одна от другой по координате  $u$ . Для нахождения коэффициента  $\gamma$  в модели с регулярной кинетикой солеотдачи использовалась формула (2.18).

Интегралы вычислялись с относительной погрешностью порядка 0.001 с использованием дополнительной квадратичной интерполяции для начального засоления. Коэффициенты в уравнениях солеобмена выбраны условно из соображения наглядности графиков.

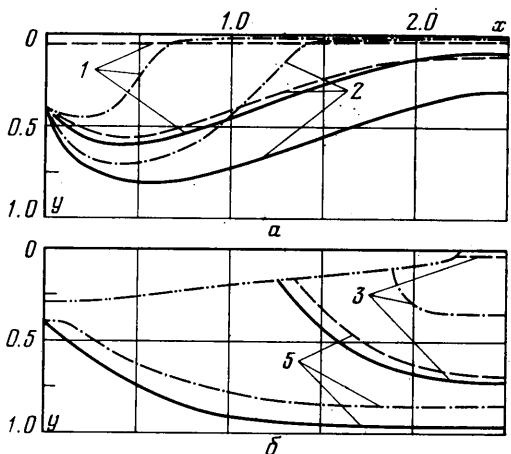
На фиг. 3 видно, что в случае регулярной кинетики солеотдачи, когда коэффициент, характеризующий интенсивность солеобмена, пропорционален скорости фильтрации, значительно контрастнее проявляется неравномерность фильтрационного процесса при сплошном затоплении. В случае частичного затопления рассоление почвы в середине междурья происходит значительно быстрее при меньшем расходе промывных вод.

Автор благодарит В. Н. Эмиха и В. И. Пеньковского за многократные и полезные обсуждения работы.

Поступила 24 VI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Эмих В. Н. Фильтрация грунтовых вод при дренажных промывках почвенного слоя с непроницаемым основанием. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 2.
2. Пеньковский В. И. Одномерная задача растворения и вымыва солей при фильтрации с большими значениями критерия Пекле. ПМТФ, 1969, № 2.
3. Нумеров С. Н., Патрашев А. Н. Диффузия растворимых веществ в основаниях гидротехнических сооружений. Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 1947, № 4.
4. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М., Физматгиз, 1961.
5. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1962.
6. Веригин В. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах. В сб. «Растворение и выщелачивание горных пород». М., Госстройиздат, 1957.



Фиг. 3