

ГИДРАВЛИКА

С. А. АНАՅԻՆ, Ж. А. АՇՈՅԻՆ, А. К. АНАՅԻՆ

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
МАССОПЕРЕНОСА ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПОТОКОМ В ГРУНТАХ

Освоение засоленных земель методом химической мелiorации является слабоизученной проблемой. Опыты показали, что содовые солончаки Араратской равнины можно освоить в кратчайшие сроки, когда капитальные промывки осуществляются однопроцентным раствором серной кислоты или порошком железного купороса по технологии, разработанной НИИ Почвоведения и Агротехники МСХ Арм. ССР.

Методика натуральных и теоретических исследований по данному вопросу изложена в [1—4], поэтому в статье она не освещается.

§1. Результаты натуральных исследований по водно-солевому режиму

Промывку засоленных земель предусмотрено производить после строительства систематического горизонтального дренажа средней глубиной заложения, равной 3,5 м, и междренним расстоянием, равным 150—200 м. Расчетные параметры дренажа установлены, исходя из нагрузки на дрены в эксплуатационный период.

Промывка содовых солончаков Араратской равнины осуществляется методом химической мелiorации, которая разработана НИИ Почвоведения и Агротехники Арм. ССР [5—7]. Содовые солончаки обрабатываются слабым раствором серной кислоты (0,8—1%) или порошком железного купороса с проведением последующих промывок для удаления солей и продуктов реакции. В результате кислотоваия имеет место радикальное улучшение почвы в смысле нейтрализации щелочности, разложения карбонатов с переходом в сульфаты и бикарбонаты кальция и магния, свертывание гидрофильных коллоидов, образование высокодисперсного гипса, активизация кальциевых соединений и питательных элементов почвы. Благодаря разложению карбонатов кальция, в среде образуются ионы кальция, которые приводят к изменению соотношений обменных катионов в сторону вытеснения натрия из поглощенного комплекса и замены его ионами кальция. В процессе кислотоваия получают продукты реакции, удаляемые из почвы промывными водами, в т. ч. и гипс, мелiorативная роль которого сказывается на последующих стадиях мелiorации.

Промывные нормы при химическом методе мелиорации содовых солончаков определяются по воднорастворимому и поглощенному комплексу ( $\text{Na}+\text{K}$ ).

Опыты [1, 6] показали, что эти нормы для воднорастворимого комплекса ( $\text{Na}+\text{K}$ ) при допустимом пороге токсичности, равном 1,5 мг-экв, получаются в 2—3 раза больше по сравнению с поглощенными ( $\text{Na}+\text{K}$ ) при допустимом пороге токсичности, равном 4 мг-экв. Последующие все расчеты относятся к воднорастворимому комплексу ( $\text{Na}+\text{K}$ ), так как он является главным показателем при установлении степени рассоления почвы и грунтовых вод.

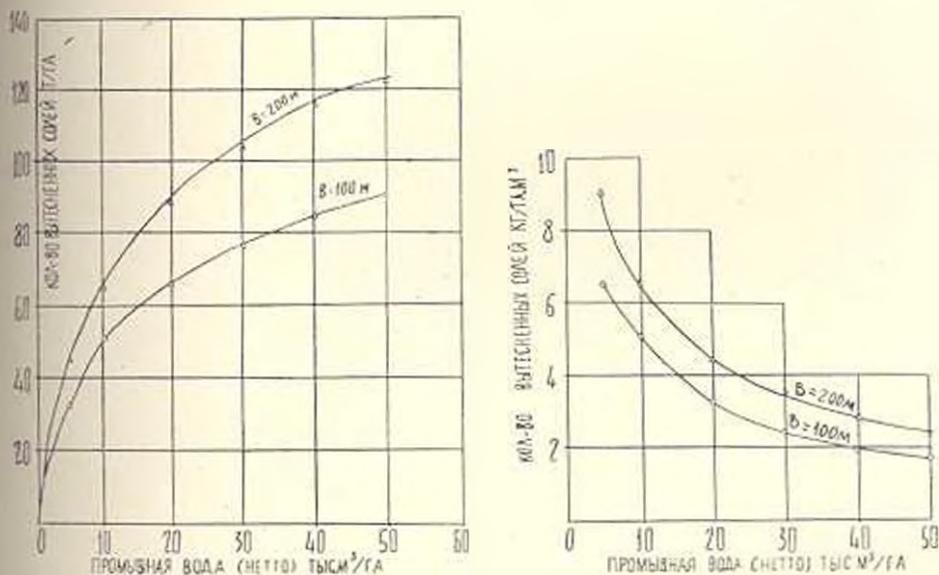


Рис. 1. Изменение коэффициента засоления и зависимости от объема промывной воды и междревного расстояния.

Процесс засоления почвы при промывках на фоне горизонтального дренажа при междрежном расстоянии, равном 100 и 200 м, приведен на рис. 1. Кривые получены на основании многолетних исследований [1] на опытно-дренажном пункте НИИВЦиГ при промывке содовых солончаков однопроцентным раствором серной кислоты и порошком железного купороса. Опыты производились на средних и тяжелых суглинках, характерных для почвенных разностей Араратской равнины.

На рис. 2—3 приведены характерные опытные кривые рассоления почвы в зависимости от объема поданной в чек промывной воды [1]. Сплошные кривые соответствуют воднорастворимому ( $\text{Na}+\text{K}$ ), а пунктирные — поглощенному ( $\text{Na}+\text{K}$ ).

На рис. 4—6 приведены характерные эпюры распределения по глубине воднорастворимого комплекса ( $\text{Na}+\text{K}$ ) по различным почвенным разрезам [1].

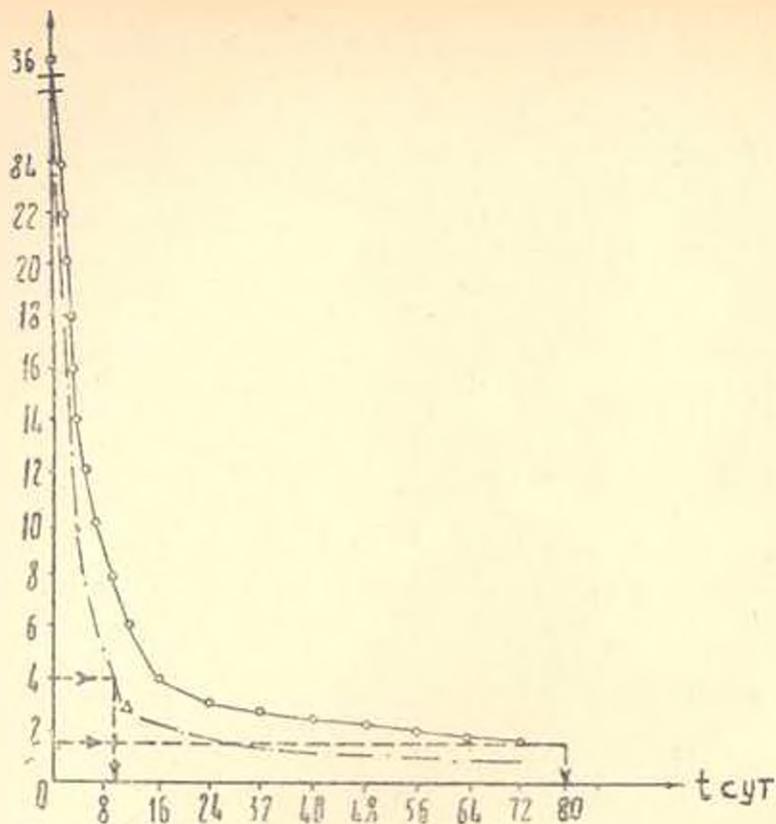


Рис. 2. Изменения запасов солей в почве в зависимости от объема промывной воды для воднорастворимого (Na + K) и поглощенного (Na + K) комплекса (тяжелосуглинистые почвы).

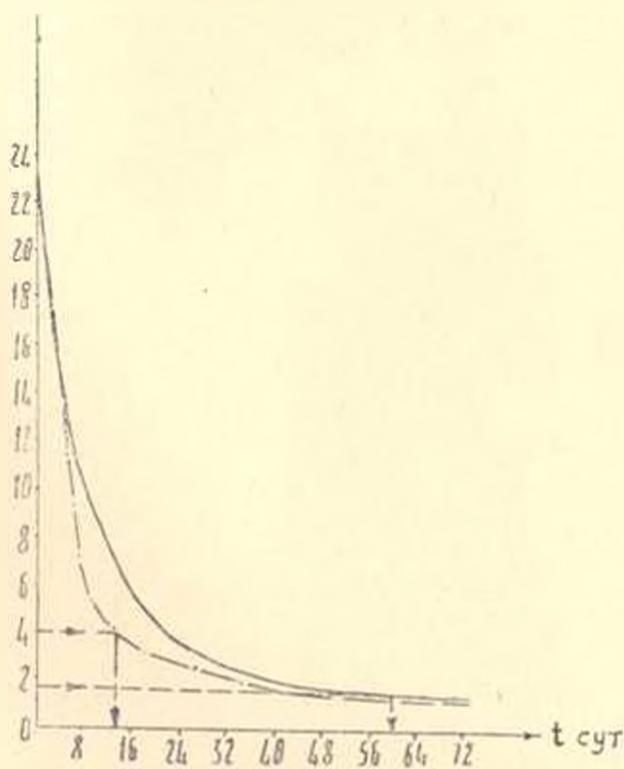


Рис. 3. То же для средне-суглинистых грунтов.

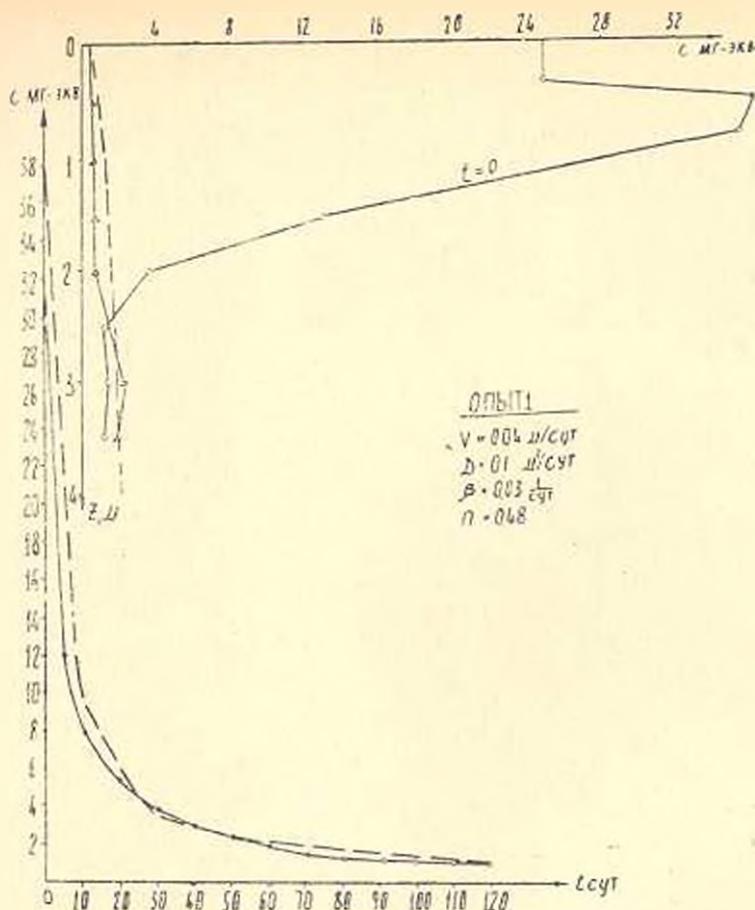


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных кривых воднорастворимого комплекса (Na + K) (опыт 1).

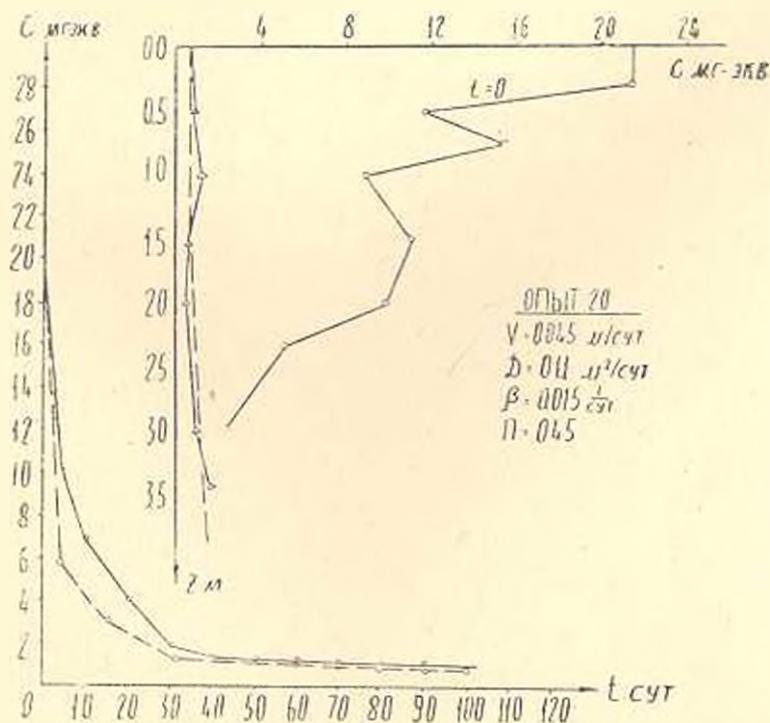


Рис. 5. То же для опыта 20.

По данным кривых рис. 2—3 при заданном содержании в почве (Na+K) для допустимого 1,5 мг-экв порога токсичности воднорастворимого (Na+K) нетрудно определить промывные нормы.

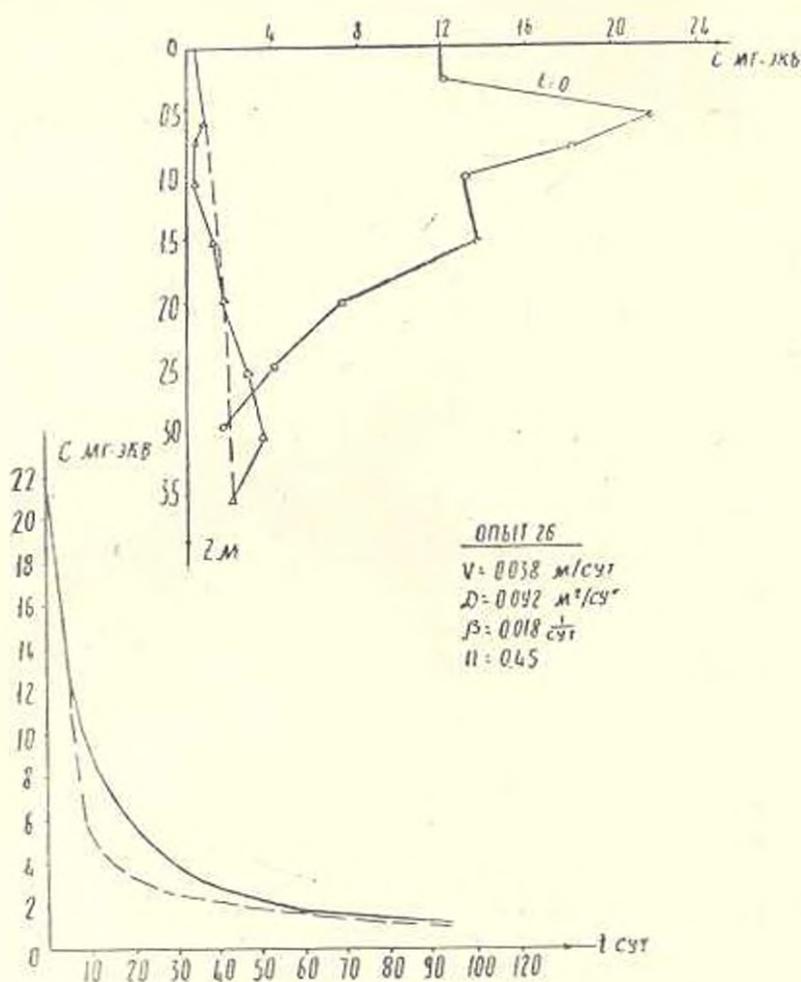


Рис. 6. То же для опыта 26.

Натурные опыты показали, что продолжительность промывки на фоне систематического горизонтального дренажа по непрерывной схеме подачи воды в чеки в зависимости от междренного расстояния, степени засоленности почвы, коэффициента фильтрации и водно-физических характеристик грунтов длится от 60 до 130 суток. При норме промывки, равной от 25000 до 50000 м<sup>3</sup>/га, средняя скорость инфильтрации воды в зоне аэрации при постоянной глубине воды в чеке, равной 0,20—0,4 м, достигает от 0,04 до 0,05 м/сут, а на отдельных вертикалях — до 0,07 м/сут.

Скорость отвода промывных вод, которая создает систематический дренаж при напоре  $h = 3.0$  м (при междленном расстоянии, равном  $B = 150$  м), получается:

$$v = \frac{=kh}{B \left( \ln \frac{B}{d} - 1 \right)} = \frac{3,14 \cdot 3,5 \cdot 3}{150 \left( \ln \frac{150}{0,5} - 1 \right)} = 0,047 \text{ м/сут.} \quad (1)$$

Отсюда видно, что при капитальной промывке отпадает необходимость строительства временного дренажа для отвода части промывных вод, так как скорость отвода, создаваемая систематическим дренажом, в среднем, получается равной скоростям инфильтрации в зоне аэрации.

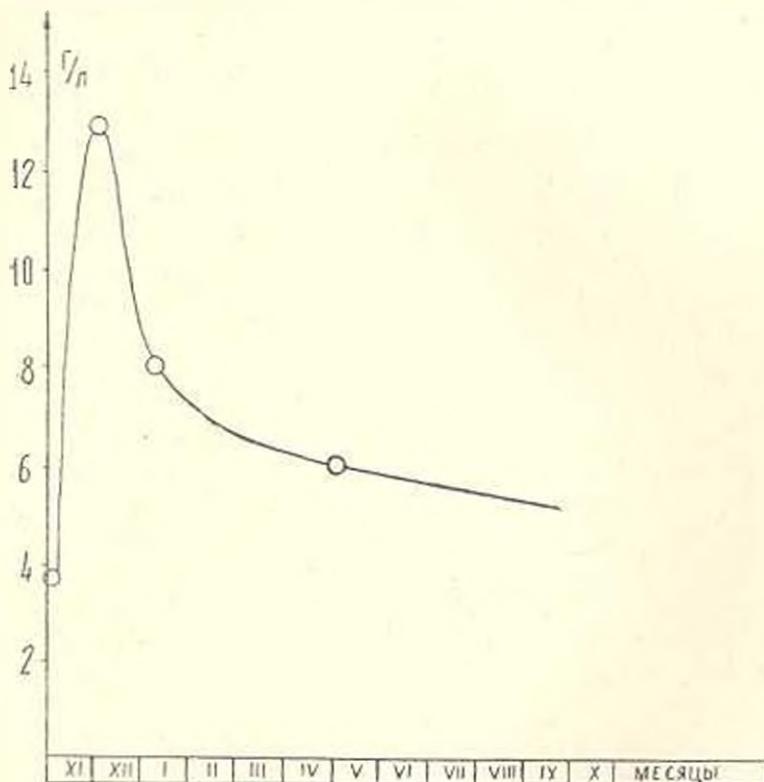


Рис. 7. Изменения по времени минерализации воды в дренаже в процессе капитальной промывки.

При капитальных промывках дренажный модуль в среднем достигает  $4 \text{ л/сек-га}$ , а иногда и больше при междренном расстоянии, равном  $150\text{--}200 \text{ м}$  [1]. При этом содержание водно-растворимых ( $\text{Na} + \text{K}$ ) почвенного раствора в чеках от своего начального значения  $30 \text{ мг-экв}$  ( $25\text{--}30 \text{ г/л}$ ) в процессе промывки уменьшается и в конце промывки достигает в среднем  $1,5\text{--}2 \text{ мг-экв}$ . При этих условиях общая минерализация вод в закрытых дренажах (рис. 7) в начале промывки увеличивается и достигает  $14 \text{ г/л}$ , а затем по времени уменьшается и приближается к  $3\text{--}4 \text{ г/л}$ . В зависимости от числа одновременно промываемых чек количество солей, поступающих в дрены, увеличивается, но концентрации солей при этом не будет сильно изменяться (характер кривой рис. 7 существенно не изменится), т. к. с увеличением тоннажа солей пропорционально увеличится и объем воды.

По инструкции [8] МСХ и ММнВХ Арм. ССР предусмотрены на засоленных землях поливные нормы увеличивать на 20—30% по отношению к обычным. Это положение установлено, в основном, из условия получения максимального урожая сельскохозяйственных культур и создания необходимой интенсивности выходящего фильтрационного потока в зоне аэрации и среднегодовом периоде времени. В эксплуатационный период полна намечается проводить речными водами, минерализация которых равняется 0,5 г/л, и откаченными водами из слабонапорного водоносного слоя, минерализация которых не превышает 1 г/л. При этом токсические компоненты солей в воде отсутствуют.

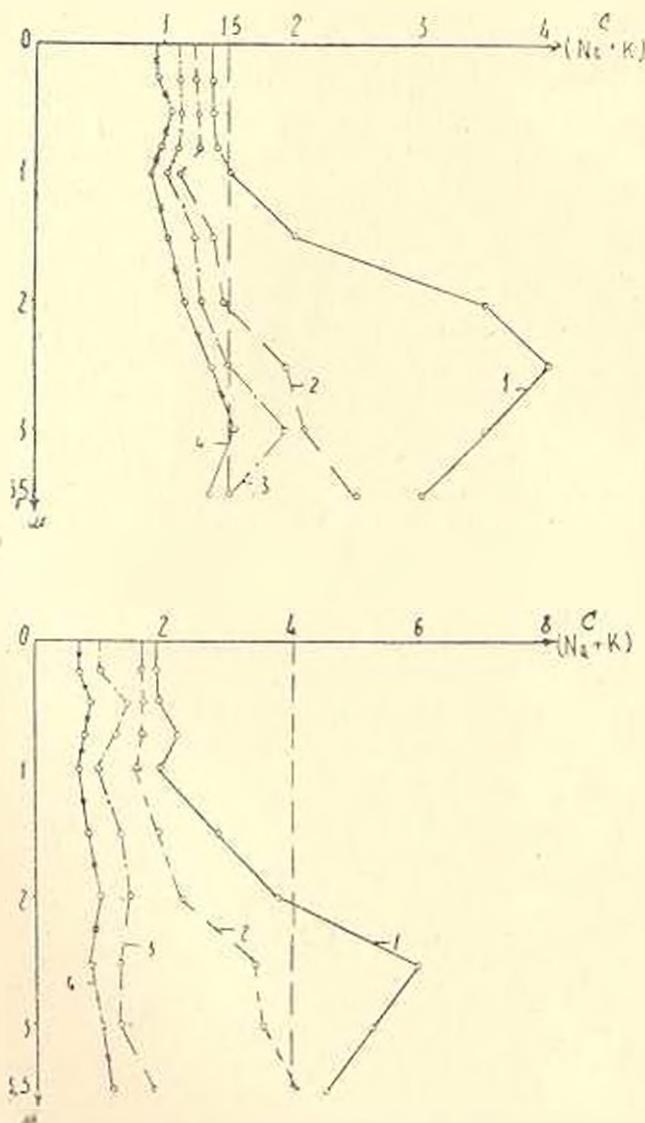


Рис. 8. Изменение по времени (по годам 1, 2, 3, 4) подиорастворимого комплекса  $(Na+K)$  в зоне аэрации в период сельскохозяйственного освоения земель (орошения).

Четырехлетние исследования [1, 2] на рассоленных землях в условиях работы горизонтального дренажа и выращивание сельскохозяйственных культур (люцерна и плодовые сады) показали, что за этот период рассоление почвы происходит по всей толще зоны аэрации (три метра и больше, рис. 8). Кроме того, в грунтовых водах и в почвах токсические компоненты смываются и уносятся дренажом. Поэтому потенциальные возможности реставрации процессов засоления при глубине осушения, равной 3 м, практически исключаются (испарения с поверхности грунтовых вод при глубине осушения 3 м достигают своих минимальных значений).

## § 2. Расчет водно-солевых режимов при капитальных промывках

Приведенные экспериментальные данные полно и надежно характеризуют работу систематического дренажа и период капитальных промывок и орошения. По этим показателям можно разрешить основные вопросы динамики водно-солевых процессов в почвах и в грунтовых водах. С целью более широкого обобщения результатов натурных исследований изложим приближенную методику расчета этих процессов, используя методы физико-химической гидродинамики.

При решении этой задачи мы не будем пользоваться существующими готовыми решениями, так как численным методом можем более точно учитывать особенности задачи.

Основные вопросы динамики водно-солевых процессов в период капитальных промывок и орошения приближенно можно разрешить при помощи известных дифференциальных уравнений массопереноса в фильтрационном потоке, которые для одномерной задачи можно представить в следующем виде:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} + \beta (C_{II} - C) = n \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация почвенного раствора для воднорастворимого комплекса;  $v$  — скорость фильтрации;  $D, \beta$  — коэффициенты конвективной диффузии и скорости растворения для воднорастворимого комплекса;  $C_{II}$  — концентрация предельного насыщения, которая принимается равной максимальному значению концентрации воднорастворимого комплекса;  $n$  — пористость грунта;  $z$  — вертикальная ось (начало координат расположено на поверхности почвы);  $t$  — время. Не останавливаясь на некоторых, пока нерешенных вопросах о применимости дифференциального уравнения (2) для содово-засоленных почв отметим, что после химической мелiorации качественные характеристики почвы претерпевают сильные изменения, их характеристики кислотности приближаются к характеристикам почв, для которых диффузионные законы Фика применимы. В значительной степени эти нерешенные вопросы разрешаются положительно тогда, когда величины коэффициентов, которые входят в

уравнение (2), определяются из натурных опытов в соответствующих почвенно-гидрогеологических условиях.

Дифференциальные уравнения (2) будем решать при следующих начальных и граничных условиях:

$$t = 0; \quad C(z) = c(z); \quad (3)$$

$$t > 0; \quad z = 0; \quad C = C_0; \quad (4)$$

$$z = M; \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

На опытно-дренажном пункте НИИВНИГ были поставлены специальные опыты для определения значений коэффициентов конвективной диффузии, скоростей растворения и фильтрации [1—2].

Дифференциальное уравнение (2) при начальных и граничных условиях (3)—(5) решаем на универсально-сеточной модели (УСМ—1) с использованием цифровой машины «Наирн—2» [3, 4, 9]. При постоянных значениях коэффициентов конвективной диффузии  $D$  и скорости растворения  $v$  конечно-разностные уравнения массопереноса (2) удобно представить в виде уравнения Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_1 - C_2}{\Phi_1} + \frac{C_2 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_2}{\Phi_3} &= \frac{C_2^i - C_2^{i-\Delta t}}{\Phi_i} \\ \frac{C_2 - C_3}{\Phi_1} + \frac{C_4 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_3}{\Phi_3} &= \frac{C_3^i - C_3^{i-\Delta t}}{\Phi_i} \\ \frac{C_3 - C_4}{\Phi_1} + \frac{C_3 - C_4}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_3}{\Phi_3} &= \frac{C_4^i - C_4^{i-\Delta t}}{\Phi_i} \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{1}{D_1 \Delta x \Delta y + \frac{v \Delta x \Delta y}{2}}; \quad \Phi_2 = \frac{1}{\frac{D \Delta x \Delta y}{\Delta z} - \frac{v \Delta x \Delta y}{2}}; \quad (7)$$

$$\Phi_3 = \frac{1}{2 \Delta x \Delta y \Delta z}; \quad \Phi_i = \frac{1}{n \Delta x \Delta y \Delta z}. \quad (8)$$

Для составления электрической блок-схемы (рис. 9) необходимо, чтобы сопротивление от узла 2 к 3 равнялось сопротивлению от узла 3 к 2. Эти условия должны быть удовлетворены для любого  $n$  узла сетки, т. е. от узла  $(n-1)$  к узлу  $(n)$  и от узла  $(n)$  к узлу  $(n-1)$ .

Чтобы преодолеть указанные выше трудности, достаточно все члены конечно-разностных уравнений помножить на некоторую постоянную величину, значение которой для каждой строки системы уравнений (6) определяем формулой

$$K_i = \left( \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (9)$$

где  $i$  — номер строки конечно-разностных уравнений (6). После осуществления этих преобразований получим расчетные формулы сопротивлений для любого узла сетки электрической блок-схемы с одновременно удовлетворяющимися условиями одинаковости гидравлических ( $\Phi$ ) или электрических ( $R$ ) сопротивлений между узлами

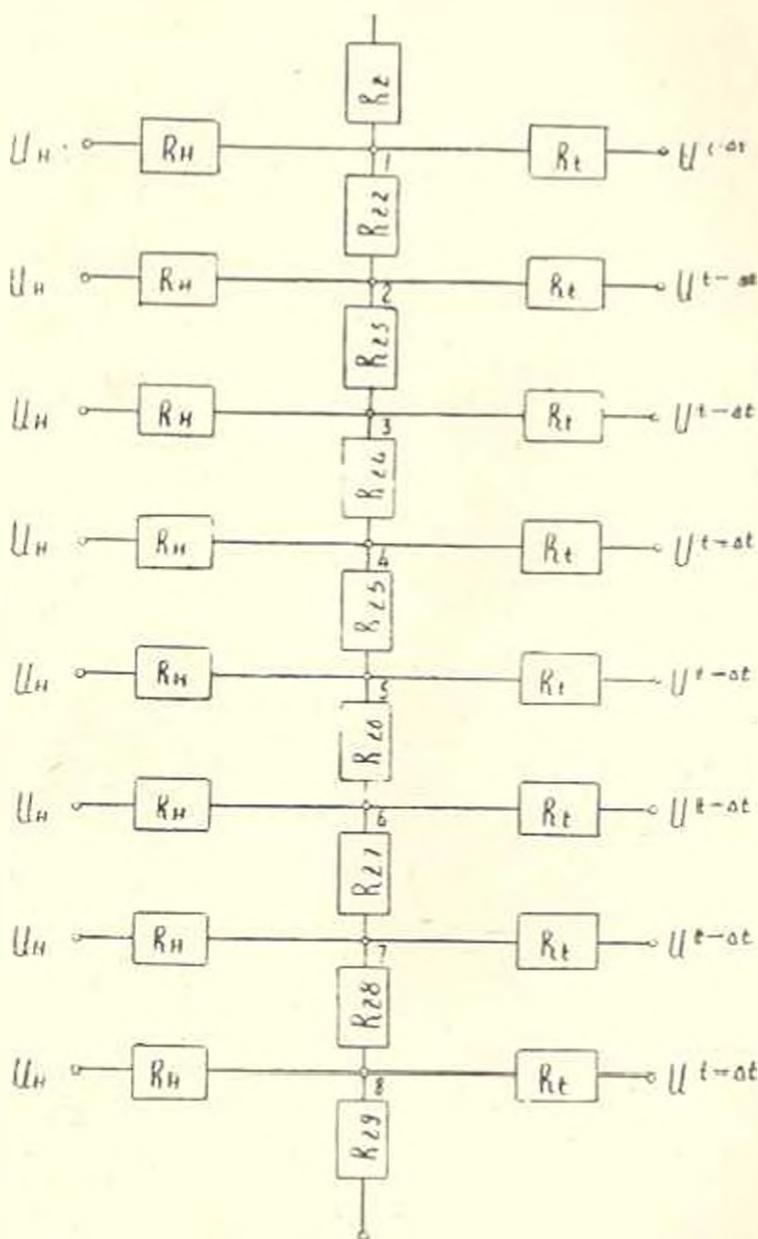


Рис. 9. Принципиальная электрическая блок-схема расчета сеточной модели.

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_1 - C_2}{\Phi_1} + \frac{C_3 - C_2}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_2}{\Phi_3} &= \frac{C_2' - C_2'^{-\Delta t}}{\Phi_1} \\ \frac{C_2 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_4 - C_3}{A_2} + \frac{C_n - C_3}{B_2} &= \frac{C_3' - C_3'^{-\Delta t}}{\Phi_{2t}} \\ \frac{C_3 - C_4}{A_2} + \frac{C_5 - C_4}{A_3} + \frac{C_n - C_4}{B_3} &= \frac{C_4' - C_4'^{-\Delta t}}{\Phi_{3t}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \frac{\Phi_2^i}{\Phi_1^{i-1}}; & B_i &= \Phi_3 \left( \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}; & \Phi_{it} &= \Phi_i \left( \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}; \\ R_{iA} &= \alpha_A A_i; & R_{iB} &= \alpha_B B_i; & R_{it} &= \alpha_R \Phi_{it}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 4–6. Сплошной линией нанесены результаты натурных опытов, а пунктирной линией — теоретических расчетов.

Из этих данных видно, что опытные и теоретические расчеты, в целом, дают удовлетворительные результаты, если считаться с весьма сложным процессом явления массопереноса в почвенной среде и неизбежными ошибками, которые обычно имеют место в натурных опытах. Теоретический метод после такой проверки можно рекомендовать для расчета водно-солевых режимов на вновь мелиорируемых землях, не выполняя при этом большого числа экспериментов.

### Практические рекомендации

1. Для средне- и тяжелосуглинистых грунтов коэффициент солеотдачи (объем воды для смыва из твердой фазы одной тонны воднорастворимого комплекса (Na+K)) при мелиорации содово-засоленной почвы порошком железного купороса можно определить из данных графиков рис. 1.

2. Промывные нормы для метрового слоя средне- и тяжелосуглинистых грунтов в зависимости от принятого допустимого порога токсичности воднорастворимого комплекса (Na+K) можно определить по данным графиков рис. 2–3.

3. Практически с достаточной точностью процесс массопереноса (процесс рассоления содово-засоленных почв) можно определить методом физико-химической гидродинамики. При этом необходимо расчетные параметры, которые входят в эти зависимости, определить натурными опытами для каждого характерного участка в отдельности.

4. Продолжительность периода промывки для сильно засоленной толщи в зависимости от начального содержания в почве воднорастворимого комплекса (Na+K) длится от 60 до 130 дней, при скоростях нисходящего фильтрационного потока 0,010–0,06 м/сут.

