

УДК 631.67.51

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНО-ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ПОЧВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ВОДНО-СОЛЕВЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Ю. И. КАЛУГИН, С. Н. КУРГАНСКАЯ, В. С. СИРЫЙ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 23.11.2000

Целью данной статьи является составление сравнительно простых имитационно-оптимизационных математических моделей для обоснования дренажно-оросительных систем на основе прогнозов оптимальных водно-солевых режимов почв с учетом водно-воздушных и тепловых условий развития растений. Подобная оценка выполняется прогнозированием составляющих водного баланса корнеобитаемого слоя, значения которых находятся математическим моделированием процессов перемещения влаги и солей в толще активного водосолеобмена (зоне аэрации) под влиянием природных и оросительных вод.

Метою даної статті є розробка порівняно простих імітаційно-оптимізаційних математичних моделей для обґрунтування дренажно- зрошувальних систем на основі прогнозів оптимальних водно-солевих режимів земель з врахуванням водно-повітряних і теплових умов розвитку рослин. Подібна оцінка виконується прогнозом складових водного балансу кореневого шару, значення яких знаходяться в результаті математичного моделювання процесів переміщення вологи та солей в товщі активного водосолеобміну (зоні аерації) під впливом природної і зрошувальної води.

The aim of this paper is to develop simple imitation-optimization mathematical models for substantiation of drainage-irrigation systems on the base of prognosis of optimal soil water-salt regimes considering the water-air and thermal conditions of growing plants. This estimation is fulfilled by the forecasting components of the water balance for root layer. Its values are determined by the mathematical simulation of moisture and salts transfer in the layer with active water-salt exchange (airation zone) taking into account natural and irrigation water.

ВВЕДЕНИЕ

В мелиоративной практике прогноз водно-солевого режима орошаемых почв с учетом лимитирующих показателей эффективного использования поливных вод приобретает особое значение в связи с необходимостью поддержания оптимального водно-воздушного и солевого режимов в период возделывания сельскохозяйственных культур [1 – 7]. Использование традиционных методов расчета водно-солевого режима на основе аналитических решений для типовых геофильтрационных схем в условиях даже гидромеханического характера фильтрационного потока не может дать объективной оценки процессам, происходящим в зоне аэрации при орошении [3 – 5]. В статье для обоснования эколого-экономической эффективности дренажно-оросительной системы предлагается метод математического имитационно-оптимизационного моделирования, который учитывает близкие к реальным режимы увлажнения, забор влаги растениями, дренаж, а также технические возможности поливной техники. Система имитационно-оптимизационного моделирования рассматривается нами как информаци-

ная технология, суть которой состоит в имитации "сценариев" естественных процессов под влиянием антропогенных управляющих воздействий. Таким образом, имитационно-оптимизационная математическая модель играет роль исследовательской лаборатории, в которой анализируются отдельные технологии и оптимизируются их параметры [5].

Имея в наличии результаты имитационного моделирования "сценариев", можно выбрать или те режимы поливов, при которых, с точки зрения потребности растений во влаге на протяжении всего вегетационного периода средняя влажность корнеобитаемого слоя меньше наименьшей влагоемкости $w_{нв}$ и больше ее критического значения $w_{кр}$, или те значения величины поливной нормы, для которых инфильтрация не превосходит заданного уровня. А в случае систем двустороннего регулирования можно выбрать оптимальный режим регулирования уровня грунтовых вод в зависимости от водопотребления растения, климатических условий, засоленности почв, минерализации грунтовых вод и др. Также возможна ресурсная оценка эффективности различных режимов орошения [2]. Так, по результатам имитационно-оптимизационного моделирова-

ния установлено, что наиболее экологически безопасными являются водосберегающие режимы орошения по сравнению с биологически оптимальными [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В упрощенном варианте рассматриваем случай системы регулируемого дренажа [11], когда уровень грунтовых вод (УГВ) в период вегетации устанавливается регулирующими устройствами, а задача имитационно-оптимизационного моделирования сводится к решению уравнений влагопереноса в зоне аэрации с переменными во времени краевыми условиями на поверхности земли с координатой $z = m$:

$$\frac{\partial w}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(w) \frac{\partial H}{\partial z} \right) + i_k, \quad (1)$$

где $w(t, z)$ – объемная влажность почвы; t – время; z – расстояние от точки отсчета ($z = 0$); $H = p + z$ – гидравлический напор; p – высота давления воды; $k(w)$ – коэффициент влагопереноса; $i_k(t, z, T)$ – интенсивность забора влаги корнями растений.

Степень развития корневой системы растений зависит от внешних условий: изменения температуры среды, освещения, влажности почвы, глубины залегания грунтовых вод и др.

В условиях предлагаемой модели скорость испарения с поверхности земли задавалась как составляющая потенциальной суммарной транспирации $E(t)$ с помощью индекса листовой поверхности $0 \leq L_c < 1$, а остальная часть распределялась по глубине корневой системы $h_k(t)$ в виде стоков, величина интенсивности которых зависит от влажности и температуры T :

$$i_k(t, z, T) = E(t) \cdot L_c(t) \cdot r(w) \cdot r(T), \quad (2)$$

где $r(w)$, $r(T)$ – редуцирующие коэффициенты, лимитирующие водозабор корневой системой растений

$$\begin{aligned} r(w) &= 0 \quad (w_{\text{п}} < w < w_{\text{вз}}), \\ r(w) &= \frac{w_{\text{п}} - w}{w_{\text{п}} - w_{\text{нв}}} \quad (w_{\text{нв}} < w < w_{\text{п}}), \\ r(w) &= 1 \quad (w_{\text{кр}} < w < w_{\text{нв}}), \\ r(w) &= \frac{w - w_{\text{вз}}}{w_{\text{кр}} - w_{\text{вз}}} \quad (w_{\text{вз}} < w < w_{\text{кр}}); \\ r(T) &= 1 \quad (T_{\text{н}} < T < T_{\text{в}}), \\ r(T) &= 0 \quad (T_{\text{в}} < T < T_{\text{н}}); \end{aligned}$$

$w_{\text{п}}$, $w_{\text{нв}}$, $w_{\text{кр}}$ – объемные влажности при полном, наименьшем и критическом увлажнении почвы соответственно; $w_{\text{вз}}$ – влажность, при которой растение прекращает транспирировать влагу; $T_{\text{в}}$, $T_{\text{н}}$ – верхний и нижний пределы температуры, ограничивающие потребление влаги растением.

В уравнении теплопереноса

$$C(z, w) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z, w) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

зависимость коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от влажности, плотности, структуры и температуры почвы принимались по аналогии с [8].

Формулы для вычисления коэффициента влагопроводности от влажности и влажности от напора H представляются аппроксимационными зависимостями вида [9]

$$k(w) = k_f \left[\frac{w - 0.05w_o}{w_{\text{п}} - w_o} \right]^{n_k}, \quad (4)$$

$$w = \frac{w_{\text{п}} + 0.5w_o e^{\frac{1}{n} \ln(\frac{H}{\beta})}}{1 + e^{\frac{1}{n} \ln(\frac{H}{\beta})}},$$

где k_f – коэффициент фильтрации; w_o – влажность при которой прекращается движение влаги; n_k , β , n – показатели которые определяются по данным опытов изучения влагопереноса конкретных грунтов.

Для прогноза миграции солей в зоне аэрации, например, химически неактивного иона Cl используется уравнение конвективной диффузии [10] (однокомпонентная модель)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(wC)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(vC)}{\partial z} - \\ &- \delta wC - \beta_c(C - C_k), \end{aligned} \quad (5)$$

где C – общая концентрация иона в поровом растворе; $D(v, C)$ – коэффициент конвективной диффузии; $v = -k(w) \frac{\partial H}{\partial z}$ – скорость влагопереноса; $0 < \delta_c < 1$ – редуцирующий коэффициент учитывающий поглощение солей корневой системой; β_c – коэффициент скорости растворения; C_k – концентрация предельного насыщения.

Для решения системы уравнений (1), (3), (5) задаются краевые условия на поверхности земли ($z = m$):

$$-k \frac{\partial H}{\partial z} = -i_o,$$

где $i_o(t)$ – интенсивность осадков при увлажнении, или

$$-k \frac{\partial H}{\partial z} = E_i,$$

где $E_i(t)$ – интенсивность испарения с поверхности почвы при иссушении.

На нижней границе ($z = z_n$) задан напор, $H = H(t)$ соответствующий регулируемому УГВ. Условия на границах для уравнения (3) соответствуют заданию известных значений температуры на поверхности земли и УГВ. Для уравнения (5) на поверхности земли задается условие $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$, а на нижней границе $C = C_n = \text{const}$. Эта система уравнений формально описывает в зоне аэрации динамику влагосолепереноса в почве. При составлении имитационно-оптимизационного сценария необходимо вычислять в процессе решения системы составляющие водного баланса корнеобитаемого слоя и среднюю концентрацию его порового раствора:

$$I_o^* = \int_0^\tau I_o(t) dt$$

(суммарное количество осадков в мм),

$$E_i^* = \int_0^\tau E_i(t) dt$$

(испарение за время τ с поверхности земли в мм),

$$P_i^* = - \int_0^\tau k \frac{\partial H(t)}{\partial z} \Big|_{z=m-h_k} dt$$

(суммарные потери влаги из корнеобитаемой зоны в зону аэрации),

$$P^* = - \int_0^\tau k \frac{\partial H(t)}{\partial z} \Big|_{z=z_n} dt$$

(суммарное поступление влаги в корнеобитаемую зону из зоны аэрации),

$$E_k^* = \int_0^\tau \int_{m-h_k}^m i_k(t, z, T) dz dt$$

(суммарный забор влаги корневой системой),

$$\theta_n = \int_{m-h_k}^m w_{np}(t) dz$$

(текущее количество продуктивной влаги в корнеобитаемой зоне в мм),

$$C^* = \frac{1}{m-h_k} \int_{m-h_k}^m C(t, z) dz$$

(средняя концентрация солей в корнеобитаемом слое, г/л),

$$B_k = I_o^* - E_i^* - P_i^* + P^* - E_k^*$$

(суммарный баланс влаги корнеобитаемого слоя).

В условиях содового загрязнения почв, распространенного на юге Украины, практическое значение приобретает использование результатов прогноза содержания в почве катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ (трехкомпонентная модель массообмена [1]). В данной разработке ограничимся рассмотрением только простейших моделей солепереноса [8], описываемых уравнением (5). Здесь особой оценке по уточнению подлежит величина интенсивности поглощения иона соли (группы ионов) корнями растений [11]. Опытные исследования указывают в принципе на не соответствие количества поглощенных солей количеству поглощенной растением влаги. Однако тип и степень засоленности почвогрунтов определяется в зависимости от содержания ионов и токсичных солей в верхнем метровом слое, а также регламентируется уровень содержания подвижных солей в корнеобитаемом слое.

Так как в системах двухстороннего регулирования основным управляемым параметром является положение УГВ, рассмотрим влияние этого параметра, а также величины минерализации грунтовых вод на солевой режим корнеобитаемого слоя с целью его регулирования. В зоне орошения близкое залегание грунтовых вод служит источником опасности вторичного засоления и осолонцевания орошаемых земель [7, 12]. По классификации ЮНЕСКО наиболее эффективно системы регулируемого дренажа могут быть использованы на участках с пресными и слабосоленными грунтовыми водами.

В ходе исследований и режимных наблюдений подтверждается зависимость "критической" глубины УГВ орошаемого участка от глубины залегания, минерализации и химизма грунтовых вод, а также от интенсивности промывного режима, характеризуемого величиной модуля дренажного стока, что указывает на необходимость прогнозируемого регулирования УГВ системой [7].

МЕТОД РЕШЕНИЯ, ПРИМЕРЫ

При численном решении задача сводится к решению системы уравнений (1), (3), (5) с переменными краевыми условиями с учетом ограничений на изменение количества продуктивной влаги и средней концентрации солей в корнеобитаемом слое.

Расчет оптимального влагосодержания в корнеобитаемом слое сводится к назначению искусственного полива при отсутствии продуктивной влаги и понижению УГВ при приближении средней концентрации солей корнеобитаемого слоя к предельно допустимой [9].

Выбор метода решения уравнений (1), (3), (5) зависит во многом от способа аппроксимации [13], что, в свою очередь, связано с точностью вычислений и интервалами продолжительности прогноза.

В настоящей работе схема реализации численного метода заключается в поэтапном решении в каждый момент времени нелинейных алгебраических уравнений, аппроксимирующих уравнение (1) на неравномерной сетке (j, k) с шагами $0.01 \text{ м} \leq h_j \leq 0.1 \text{ м}$, а также местами ее сгущения у поверхности земли и границах раздела слоев. Уравнения (3), (5) дискретизацией только по переменной z аппроксимируются системой дифференциально-разностных уравнений, которая решается методом Эйлера-Коши с итерациями по нелинейностям в коэффициентах [14].

Основная масса корней, активно потребляющих воду и минеральные элементы, размещается в верхнем слое грунта толщиной менее 1 м, при этом у большинства растений корни не превышают 0.5 м. В реальных условиях корнеобитаемый слой – неизотропный, насыщенный ходами животных и насекомых, корневыми пустотами, а также прослойками грунта, для которых горизонтальная влагопроводность существенно больше вертикальной. Поэтому зона аэрации по своему гидрогеологическому строению должна рассматриваться как минимум двухслойной с вертикальной проницаемостью, большей чем горизонтальная. В противном случае должна использоваться двумерная или пространственная модель влагопереноса. В настоящей серии задач грунт зоны аэрации выбран изотропным, двухслойным. Неравномерная сетка, состоящая из 55 узлов по оси z имеет места сгущения – границу раздела слоев ($z = 2.5$) и поверхность земли ($z = 3$).

Шаг по времени τ_k выбирался переменным и равным 0.1 продолжительности осадков, а для периода испарения автоматически увеличивался в 1.3 раза до максимального 0.2 суток. Эффективность выбора такой дискретизации подтвердилась при обосновании критической глубины УГВ для разных агроклиматических условий.

Значения параметров водно-физических характеристик верхнего слоя грунта толщиной 0.5 м были выбраны: $k_{\phi} = 0.25 \text{ м/сут}$, $n_k = 2.4$, $w_{\text{п}} = 0.5$, $w_o = 0.15$, $\beta = 8.17$, $w_{\text{нв}} = 0.4$, $w_{\text{кр}} = 0.31$, $w_{\text{эв}} = 0.28$; а для нижнего подстилающего слоя

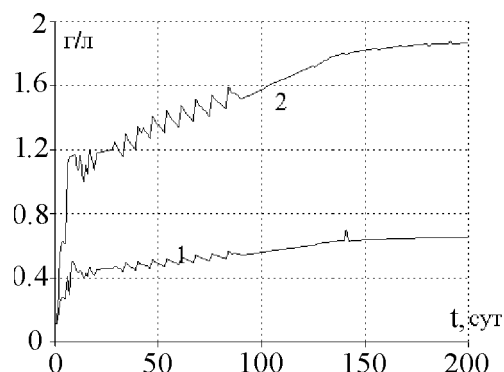


Рис. 1. Изменение средней концентрации солей порового раствора корнеобитаемого слоя в период вегетации для различной степени минерализации грунтовых вод при глубине их залегания 2 м: 1 – минерализация 1.0 г/л; 2 – минерализация 3.0 г/л

грунта $k_{\phi} = 0.1$, $n_k = 1.75$, $w_{\text{п}} = 0.4$, $w_o = 0.1$, $\beta = 12.3$, $w_{\text{нв}} = 0.32$, $w_{\text{кр}} = 0.22$, $w_{\text{эв}} = 0.19$.

Приведенные рисунки 1 и 2 иллюстрируют результаты численных расчетов, выполненных при разной степени изначального засоления зоны аэрации. В вариантах с разным уровнем стояния грунтовых вод и одинаковыми климатическими условиями интерес представляет изменение средней концентрации солей корнеобитаемого слоя в течение вегетационного периода в зависимости от глубины залегания грунтовых вод, их минерализации. Задача моделирования водно-солевого режима корнеобитаемого слоя сводится к обоснованию "критической" глубины залегания грунтовых вод. Поэтому была проведена серия расчетов с учетом количества осадков для обыкновенного года (352 мм), при этом суммарная транспирация задавалась переменной от 2 до 8 мм/сут, осадки – величиной от 10 до 50 мм, температура поверхности почвы изменялась от 3° до 20° , мощность корневого слоя – от 0.15 до 0.5 м.

При двустороннем регулировании влажности корнеобитаемого слоя основными показателями следует рассматривать наличие в нем продуктивной влаги и среднюю концентрацию солей в ней, оптимальные значения которых зависят от вида растения и фазы его развития.

На рис. 1 представлены сценарии развития процесса накопления солей в корнеобитаемом слое при изначальной их концентрации 0.1 г/л в поровом растворе приповерхностного слоя мощностью 0.25 м, и зоны аэрации 1 г/л и 3 г/л, при уровне грунтовых вод – 2 м. Составляющие водного баланса корнеобитаемого слоя за расчетный пери-

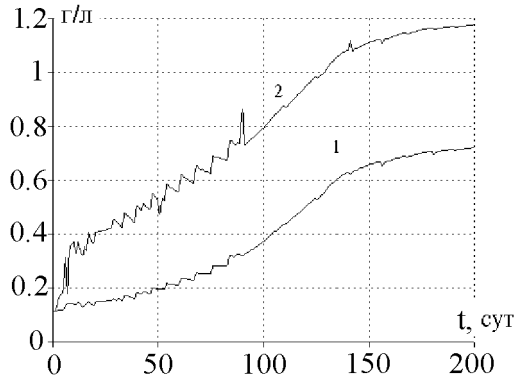


Рис. 2. Изменение средней концентрации солей порового раствора корнеобитаемого слоя в период вегетации в зависимости от мощности слоя изначального рассоления зоны аэрации: 1 – УГВ 2 м, минерализация грунтовых вод 3.0 г/л, мощность приповерхностного слоя зоны аэрации с начальной концентрацией солей 0.1 г/л равняется 1.5 м; 2 – мощность слоя с начальной концентрацией 0.1 г/л равняется 1 м

од 210 сут следующие: суммарная транспирация – 326 мм, осадки – 276 мм, превышения поступления воды из зоны аэрации в этот слой над потерями 14 мм, что является главным показателем устойчивого засоления корнеобитаемого слоя в течение летнего сезона.

Как следует из рис. 1 в основном процесс засоления корнеобитаемого слоя происходит в первые 20 – 30 сут. и стабилизируется через 100 – 140 сут, т.е. к середине теплого сезона. Кратковременные колебания средней концентрации корнеобитаемого слоя ($h_k < 0.25$ м) в весенний период вызваны изменениями влажности в нем за счет осадков и суммарной транспирации. К концу сезона ($t \geq 200$ сут., $h_k \geq 0.5$ м) предельные значения концентрации солей существенно меньше значений концентрации солей в грунтовых водах и в зоне аэрации в целом.

В зимний сезон при значительном превышении осадков над испарением происходит промывка верхнего слоя до изначальной концентрации 0.1 г/л. Как показывают расчеты, создание путем дополнительных поливов промывного режима требует большего количества воды, и мало эффективно, поэтому более действенным будет регулирование уровня грунтовых вод и поддержание его на некоторой безопасной критической глубине.

На рис. 2 представлена динамика развития засоления корнеобитаемого слоя при другой изначальной концентрации солей в верхнем приповерхностном слое зоны аэрации мощностью 1.5 м, рав-

ной 0.1 г/л. Расчет показывает, что интенсивность засоления корнеобитаемого слоя существенно изменяется в начальный период времени, равный 140 сут. В конце сезона концентрация солей в корнеобитаемом слое значительно ниже концентрации солей в грунтовых водах (3 г/л). Таким образом, влияние изначального засоления зоны аэрации на процесс накопления солей в корнеобитаемом слое за сезон в данном случае имеет определяющее значение. Моделирование различных "сценариев" процесса засоления корнеобитаемого слоя дает возможность оценить и учесть влияние даже изменения составляющих водного баланса слоя, а также требования сельскохозяйственных культур к водно-солевому режиму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процессов засоления корнеобитаемого слоя при регулировании влажности этого слоя в полевых или лабораторных условиях связано с большими трудностями в организации и проведение специальных опытов. Однако, благодаря численному решению уравнений влагосолепереноса и построению имитационно-оптимизационной модели регулирования процессов влагосолепереноса в течение вегетационного периода, становится практически возможным обоснование оптимальных систем регулирования водно-солевого режима орошаемых почв.

В настоящей работе для конкретных климатических условий, уровней грунтовых вод и степени их засоления показано развитие процесса засоления корнеобитаемого слоя за летний сезон для разных сценариев начальной стадии их развития.

Предложенная здесь имитационно-оптимизационная модель вполне годится для обоснования дренажных систем при их реконструкции и проектировании.

В области междренного расстояния изменение уровня грунтовых вод можно определить на основе аналитических решений задач фильтрации для конкретной геофильтрационной схемы. В частности, для однослойной среды можно принять

$$H(t) = H_{др} + \frac{L + \Phi_{др}}{k_{\Phi}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (Q_{за}(t) - v_{nk}) \right), \quad (6)$$

где $H_{др}$ – напор на дрене; L – междреннее расстояние; $\Phi_{др}$ – общее фильтрационное сопротивление дрены; $Q_{за}$ – запасы влаги в зоне аэрации; v_{nk} – водообмен между корнеобитаемым слоем и зоной аэрацией.

1. Айдаров И.П. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель.– М.: Агропромиздат, 1985.– 304 с.
2. Айдаров И.П., Голованов А.И., Никольский Ю.Н. Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель.– М.: Агропромиздат, 1990.– 57 с.
3. Клименко Н.А. Почвенные решения гидроморфных почв. Полесье УССР.– К.: Издательство УСХА, 1990.– 174 с.
4. Гоголев И.Н., Баяр Р.А., Кулибабин А.Г. и др. Орошение на Одессине. Почвенно-экологические и агро-технические аспекты.– Одесса: Реч. Изд. Отд. НПО "Элита", 1992.– 436 с.
5. Харченко О.В. Вибір проектного режиму зрошення сільськогосподарських культур // Міжвід. Т. наук.-тех. Зб. Меліорація і водне господарство.– 1999.– 82.– С. 35–41.
6. Ковальчук П.І., Михальська Т.О., Ковальчук В.П., Писаренко П.В. Екологічно-економічне обґрунтування поливних та зрошувальних норм на основі інформаційних технологій // Міжвід. Т. наук.-тех. Зб. Меліорація і водне господарство.– 1999.– 86.– С. 21–27.
7. Калугин Ю.И., Сирый В.С., Курганская С.Н. Обоснование экологически безопасных условий регулирования водно-солевого режима зоны аэрации в условиях дефицита водных ресурсов // Вісник УДАВГ.– Сб. ст. Рівне.– 1998.– С. 66–69.
8. Создание мелиоративных систем нового типа // Тр. ВНИИГиМ - М.: Ротапринт ин-та.– 1999.– 79.– С. 256.
9. Куртнер Д.А., Чудновский А.Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв.– Л.: Гидрометеиздат, 1979.– 231 с.
10. Рекс Л.М., Якиревич А.М. Методика расчета тепловлагосолепереноса в насыщенных и ненасыщенных грунтах с помощью ЭВМ // Моделирование гидрогеохимических процессов и научные основы гидрогеохимических прогнозов.– М.: Наука, 1985.– 174–182 с.
11. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров.– М.: Изд. "Мир", 1985.– 383 с.
12. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.– М.: Наука, 1980.– 536 с.