

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИКЛИНГА КОЛЛЕКТОРНО–ДРЕНАЖНЫХ ВОД ДЛЯ ОРОШЕНИЯ ПОЧВ

*А. Н. Николаенко, доктор технических наук, профессор
ФГБНУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ и МЕЛИОРАЦИИ ИМ. А..Н. КОСТЯКОВА»,
г. Москва, Россия*

*А. А. Кавокин, кандидат физико-математических наук, профессор
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬФАРАБИ
г. Алматы, Казахстан*

*В. П. Максименко, доктор сельскохозяйственных наук, с.н.с.
ФГБНУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ и МЕЛИОРАЦИИ ИМ. А..Н. КОСТЯКОВА»,
г. Москва, Россия*

Сформулирована задача принятия решений применения коллекторно-дренажных минерализованных вод для орошения почв в условиях дефицита оросительной воды; задача решается с применением предложенной математической модели прогноза химического состава дренажного стока при орошении; выбран объект исследования – чернозем и определены его основные физико-химические характеристики; проведены прогнозные расчеты воздействия дренажного стока на физико-химические свойства почвы при повторном орошении для принятия решения о рециклинге.

Problem of estimation of possibility the collector and drainage mineralized water reuse for an irrigation (recycling) by the lack of fresh water is formulated. For solution of the problem mathematical model describing a chemical composition of a drainage water after irrigation was developed ; the chernozem soil was chosen as an object of research , its main physical and chemical characteristics were determined and thereafter calculations of expected impact of a drainage parameters on properties of soil in case of irrigation water reuse were carried out for evaluation of possibility of a recycling.

Принятие решения о повторном использовании для орошения почв коллекторных и дренажных вод (рециклинг) - задача, которая имеет как теоретическое, так и практическое значение.

Это особенно важно для регионов, где наряду с благоприятными природными условиями для сельскохозяйственного производства, имеется дефицит водных ресурсов, например, Крым, и создание коллекторно-дренажной системы находится в фазе проектирования. В таких условиях затруднительно в априори определить пригодность коллекторно-дренажного стока для повторного орошения почв, так как не известен его химический состав, а физическое моделирование задачи в полном объеме займет много времени и потребует значительных материальных затрат. В этом случае наиболее целесообразно для уменьшения объема исследований использовать математическое моделирование процесса образования дренажного стока с постановкой ограниченного объема лабораторных опытов для определения параметров процесса и его расчета.

С этой целью была адаптирована математическая модель передвижения многокомпонентного почвенного раствора, учитывающая основные физико-химических процессы, такие как конвективно-диффузионный массоперенос, ионообменное взаимодействие между фазами почвенных солей, растворение-кристаллизацию солей с учетом кинетики реакций [3,4]. В результате взаимодействия оросительной воды с почвой изменяются химические составы поровых растворов (ПР), твердой фазы (ТФ) и почвенного поглощающего комплекса (ППК).

В рамках формулируемой модели, описывающей процесс солепереноса, примем следующие допущения: 1) солеперенос происходит в изотермических условиях; 2) конвективно-диффузионный перенос почвенного раствора происходит в вертикальном направлении; 3) свойства почвы в любом сечении, перпендикулярном потоку, однородны и изотропны; 4) скорость фильтрации является известной функцией времени - больше нуля при инфильтрации влаги в почву (полив, осадки) и меньше нуля - при испарении. Принятые допущения

упрощают математическую модель, так например, допущение 2 и 3 позволяют рассматривать одномерную задачу. Многокомпонентная система содержит основные ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , $(\text{Cl}+\text{HCO}_3)^-$ и соли CaSO_4 , MgSO_4 , $\text{Na}(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$, Na_2SO_4 . Растворимость CaSO_4 зависит от конкретного состава ПР [8], растворимость других солей постоянна. Хлориды кальция и магния присутствуют только в виде ионов в ПР (большая растворимость в воде).

Учитывая вышеприведенные допущения, процесс солепереноса может быть описан системой дифференциальных и алгебраических уравнений, включающих уравнения конвективной диффузии ионов с источниками-стоками, обусловленными межфазными процессами: ионным обменом катионов между ПР иППК (Q_{ij}), растворением-кристаллизацией солей ($Q_{\text{Ткл}}$):

$$W \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - V \frac{\partial C_i}{\partial x} - \beta_i (C_i - C_{Pi}) - \delta_{\text{кл}} (C_{\text{кл}} - C_{\text{Hkl}}) \quad (1-5)$$

Где C_i - концентрация i -го иона в ПР, мг.экв/л ($i=1,2,\dots,5$ соответствует ионам Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}); $C_{\text{кл}}$ - концентрация гипотетической соли в ПР, образованной k -катионом и l - анионом, мг.экв/л ; C_{Hkl} - концентрация насыщения соли в растворе; C_{Pi} - равновесная концентрация катионного обмена ; W - влажность почвы (объемная), соответствующая активной пористости; t - время, сут; x - пространственная координата, м; D_i - коэффициент конвективной диффузии иона в растворе, $\text{м}^2/\text{сут}$; V - скорость фильтрации или испарения воды, $\text{м}/\text{сут}$; β_i - коэффициент скорости ионообменной сорбции катионов ($i=1,2,3$), $1/\text{сут}$; $\delta_{\text{кл}}$ - коэффициент скорости растворения- кристаллизации соли, $1/\text{сут}$.

Источники-стоки катионов, обусловленные ионообменной сорбцией, описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{N_i^{\frac{1}{z_i}}}{N_j^{\frac{1}{z_j}}} = K_{ij} \frac{C_{Pi}^{\frac{1}{z_i}}}{C_{Pj}^{\frac{1}{z_j}}}, \quad i \neq j \quad (6,7) \quad \sum_{i=1}^n N_i = Q \quad (8)$$

$$\xi \frac{dN_i}{dt} = \beta_i (C_i - C_{ip}), \quad i=1,2,3, \quad (9-11)$$

где N_i - содержание i - го катиона в ППК, мг.экв/ 100г; K_{ij} - константы парного катионообменного равновесия; z_i - заряд катиона; ξ - коэффициент пересчета концентрации между твердой или сорбированной фазой и раствором ($\xi=10d/W$); d - плотность естественного сложения почвы, г/см³; уравнения (6,7) - изотермы парного ионообменного равновесия Б.П. Никольского [6]; уравнение (8) отражает постоянство емкости обмена - Q для ППК данного типа почв ; уравнения (9-11) описывают кинетику катионного обмена. Система уравнений (6-11) решается относительно неизвестных N_i , C_{pi} . Равновесные концентрации C_{pi} входят как параметры в уравнения (1-3) и являются функциями процесса, должны вычисляться на каждом временном шаге при численном решении системы уравнений, составляющей модель.

Источники-стоки, связанные с растворением-кристаллизацией солей твердой фазы почв, происходящие с конечной скоростью и входящие в правую часть уравнения (1), могут быть записаны в виде:

$$\xi \frac{dN_{kl}}{dt} = \delta_{kl} \left(\frac{N_{kl}}{N_{Ok}} \right)^{\alpha} (C_{kl} - C_{Hkl}), \quad (12)$$

где N_{kl} – содержание соли твердой фазы почвы, образованной k - катионом и l – анионом, мг.экв./100г.; ; N_{Ok} – содержание соли в начальный момент времени, мг.экв./100г.; C_{kl} – концентрация соли в поровом растворе, мг.экв./л; C_{Hkl} – растворимость соли; δ - коэффициент скорости растворения, 1/сут; α – число, определяемое дисперсностью соли твердой фазы и ее удельной кристаллической поверхностью. Исходное содержание солей твердой фазы почв определяется на основе связи концентрации ионов водной вытяжки в гипотетические соли. Предлагается принять следующий порядок связи: Ca^{2+} связывается с SO_4^{2-} , остаток SO_4^{2-} - с Mg^{2+} , остаток SO_4^{2-} - с Na^+ , остаток Na^+ - с Cl^- . В формализованной записи это можно представить следующим образом:

если $C_{Ca} \geq C_{SO4}$, то $C_{CaSO4} = C_{SO4}$ ($C_{MgSO4} = C_{Na2SO4} = 0$); если $C_{Ca} < C_{SO4}$, то $C_{SO4} = C_{Ca}$; $C_{MgSO4} = \min(C_{Mg}, C_{SO4} - C_{Ca})$; если $C_{Mg} > C_{SO4} - C_{Ca}$, то $C_{NaCl} = C_{Na}$ ($C_{Na2SO4} = 0$), иначе $C_{Na2SO4} = \min(C_{SO4} - C_{Ca} - C_{Mg}, C_{Na})$, если $C_{Na} > C_{Na2SO4}$, то $C_{NaCl} = C_{Na} - C_{Na2SO4}$, иначе $C_{NaCl} = 0$.

Система уравнений (1-12), составляющая математическую модель, должна быть дополнена начальными и граничными условиями. В начальный момент времени задаются концентрации ионов в ПР, их содержание в ППК и в твердой фазе почвы:

$$C_i|_{t=0}=C_{0i}, i=1, \dots, 4; C_5|_{t=0}=(C_1+C_2+C_3-C_4)|_{t=0}; N_i|_{t=0}=N_{0i}, i=1, 2, 3. N_{kl}|_{t=0}=N_{0kl}$$

На верхней границе ($x=0$) записывается граничное условие для концентрации C_i в зависимости от знака скорости:

$$C_i|_{x=0}=C_{Gi}, \text{ при } V \geq 0; \quad (D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - VC_i)|_{x=0}=0, \text{ при } V < 0.$$

На нижней границе ($x=L$) запишем условие, не зависящее от знака скорости:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} \Big|_{x=L}=0.$$

Решение системы уравнений (1-12) при выбранных начальных и граничных условиях проводится методом конечных разностей [7] с использованием программы, составленной А.А. Кавокиным.

Система уравнений, составляющая математическую модель, включает в себя параметры и коэффициенты, которые необходимо определить для проведения практических расчетов. Это коэффициенты конвективной диффузии ионов в водно-почвенной системе D_i , константы парного ионообменного равновесия катионов K_{ij} , коэффициенты скорости ионообменной сорбции катионов β_i , коэффициенты скорости растворения солей твердой фазы почв δ_{kl} , параметры ξ, α . Одни из них, такие как константы парного ионообменного равновесия катионов K_{ij} , отражают закономерности ионообменных процессов, происходящих между жидкой и сорбированной фазами почв, и могут быть определены экспериментально для конкретных пар

катионов в конкретных почвах. Другие же параметры, такие как β_i , δ_{kl} , зависят от условий протекания процессов и могут быть оценены на основе экспериментальных данных [1,5]. Исследованию параметров конвективно-диффузионного переноса в почвах D_i посвящено много работ [2]. Достаточно будет отметить, что для большинства природных условий и почв при использовании моделей солепереноса, в которых параметр конвективной диффузии имеет смысл коэффициента, отражающего соответствующий физический процесс, можно полагать $D \sim 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сут.}$

Для констант парного ионообменного равновесия, согласно экспериментальным данным, полученным для солонцовых почв и черноземов Заволжья, можно принять $K_{31}=0,121 \pm 0,018$; $K_{12}=1,155 \pm 0,145$.

Методы оценки коэффициентов скорости ионообменной сорбции β приведены в работах [1,5].

Удовлетворительное соответствие расчета по модели экспериментальным данным [3] позволяет использовать данную математическую модель для решения практических задач, в том числе и задач рециклинга.

В качестве объекта исследования была выбрана почва - чернозем из Сыртового Заволжья (село Красноармейское, Куйбышевская область), горизонт 20-40 см. Основные физические и химические характеристики почвы следующие: объемная масса (плотность естественного сложения) - $1,15 \text{ г/см}^3$, пористость общая - 47 %, содержание фракции $d < 0,001 \text{ мм}$ - 40 %.

Анализ водной вытяжки, мг.экв/100 г:

Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
0,50	1,00	0,25	0,05	0,95	0,75

Состав катионов ППК, мг.экв/100 г:

Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
1,0	1,0	23,0	3,0

На основании равновесных и динамических опытов по промывке образцов почвы в лабораторных условиях были получены значения коэффициентов и параметров математической модели, используемых в

дальнейшем для прогнозных расчетов. Эти коэффициенты и параметры имели следующие значения: $D_i = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сут}$, $\beta_i = 2 \text{ 1/сут}$, $K_{31} = 0,12$; $K_{12} = 1,15$; $\delta_{15} = 1,0$; $\delta_{25} = 0,07$; $\delta_{34} = 0,08$; $\delta_{35} = 0,03$; $\alpha = 0,7$.

В качестве первого, был проведен прогнозный расчет дренажного стока, содержания твердой фазы солей и состава ППК, полученный при орошении чернозема слабоминерализованной водой следующего ионного состава, мг.экв/л: $\text{Ca}^{++} - 10$, $\text{Mg}^{++} - 10$, $\text{Na}^+ - 10$, $\text{Cl} + \text{HCO}_3^- - 10$, $\text{SO}_4^{--} - 20$. При скорости фильтрации, равной $0,05 \text{ м/сут.}$, и оросительной норме порядка $8000 \text{ м}^3/\text{га}$ расчетные физико-химические показатели профиля почвы (состав ПР, содержание солей твердой фазы почвы и состав ППК), установившиеся в результате орошения почвы слабоминерализованной водой, приведены в таблице 1. На каждом уровне почвенного профиля был рассчитан тот состав порового раствора, который сформировался в результате взаимодействия оросительной воды с почвой в процессе поливов. В нашем случае химический состав порового раствора на глубине 1 метр был принят за состав дренажного стока и составлял следующие значения, мг.экв/л:

$\text{Ca}^{++} - 29,5$, $\text{Mg}^{++} - 4,4$, $\text{Na}^+ - 19,5$, $\text{Cl} + \text{HCO}_3^- - 12,5$, $\text{SO}_4^{--} - 40,8$. Эти же значения соответствовали составу оросительной воды для последующих поливов почвы с показателями, установившимися в результате первых поливов (табл.1).

Таблица 1. Физико-химические характеристики почвы после ее орошения слабоминерализованной оросительной водой (прогноз)

Глуб., м	Поровый раствор, мг.экв/л					Тв. фаза почвы, мг.экв/100 г				ППК, мг.экв/100 г		
	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	Cl	SO_4^{--}	CaSO4	MgSO4	Na2SO4	NaCl	Ca.ex	Mg.ex	Na.ex
0.00	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	0.5	0.0	0.0	0.0	19.7	6.8	1.4
0.10	15.9	4.7	11.9	10.0	22.5	0.5	0.0	0.0	0.0	22.0	4.0	1.7
0.20	18.4	3.2	13.6	10.0	25.1	0.6	0.0	0.0	0.0	22.5	3.3	1.9
0.30	20.1	2.9	14.9	10.1	27.8	0.7	0.0	0.1	0.0	22.6	3.2	2.0
0.40	21.9	3.0	15.9	10.2	30.6	0.7	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0
0.50	23.7	3.3	16.9	10.4	33.4	0.8	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0
0.60	25.7	3.6	17.7	10.8	36.2	0.8	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0
0.70	27.6	3.9	18.5	11.3	38.8	0.9	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0
0.80	28.9	4.2	19.1	11.9	40.4	0.9	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0

0.90	29.5	4.4	19.4	12.5	40.8	1.0	0.0	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0
1.00	29.5	4.4	19.4	12.5	40.8	1.0	0.1	0.1	0.0	22.6	3.1	2.0

В табл.2 приведены результаты расчета влияния второго этапа орошения на физико-химические характеристики почвы. Эти данные показывают, что

Таблица 2. Физико-химические характеристики почвы после ее орошения минерализованной водой, соответствующей составу дренажного стока (прогноз)

Глуб., м	Поровый раствор, мг.экв/л					Тв. фаза почвы, мг.экв/100 г				ППК,мг.экв/100 г		
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CaSO ₄	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	NaCl	Ca.ex	Mg.ex	Na.ex
0.00	29.5	4.4	19.5	12.5	40.9	1.0	0.0	0.0	0.0	20.8	4.8	2.1
0.10	27.9	6.7	18.7	12.5	40.9	0.4	0.0	0.0	0.0	20.1	5.7	1.9
0.20	27.8	7.6	17.8	12.5	41.0	0.4	0.0	0.0	0.0	20.0	5.8	1.8
0.30	28.1	7.8	17.1	12.5	41.1	0.4	0.0	0.00	0.0	20.3	5.6	1.7
0.40	28.3	7.5	16.6	12.5	41.2	0.4	0.0	0.00	0.0	20.6	5.4	1.7
0.50	28.2	7.0	16.3	12.4	41.3	0.4	0.0	0.1	0.0	20.9	5.0	2.0
0.60	25.8	6.3	16.2	12.8	41.5	0.4	0.0	0.1	0.0	21.3	4.7	2.0
0.70	27.3	5.7	16.1	12.3	41.7	0.4	0.0	0.1	0.0	21.6	4.3	2.0
0.80	26.8	5.0	16.3	12.5	42.0	0.4	0.0	0.1	0.0	21.9	3.9	2.0
0.90	26.5	4.5	16.4	12.5	42.3	0.4	0.0	0.1	0.0	22.2	3.6	2.0
1.00	25.8	4.0	16.5	12.5	42.7	0.4	0.1	0.1	0.0	22.6	3.3	2.0

несмотря на значительную минерализацию воды повторного орошения по сравнению с первым, не происходит существенного изменения физико-химических характеристик почвы и ухудшения ее водно-физических свойств. Так, например, максимальное содержание натрия в ППК- 2.0 не превышает 10 % от емкости ППК, а содержание солей по профилю почвы не превышает 0,1 %.

Таким образом, в данном случае можно рекомендовать применение технологии рециклинга. Кроме того, данные таблицы 2 могут помочь в выборе оптимальной глубины заложения дренажной системы.

Разработанная программа для РС позволяет оперативно осуществлять прогнозные расчеты и принимать решения относительно использования дренажно-сбросной воды в условиях функционирования осушительно-увлажнительных систем при неограниченном числе поливов.

Библиографический список

1. Кавокин, А. А. К оценке скорости ионообменной сорбции натрия и кальция в почвах [Текст] / А. А. Кавокин, А. Н. Николаенко // Почвоведение. – 1981. - №11. - С. 71 - 75.
2. Моделирование и управление водно-солевым режимом почв // Алма-Ата: Изд. «Наука Казахской ССР», 1976. – 180 с.
3. Николаенко, А. Н. Математическая модель многокомпонентного солепереноса в почвах с учетом кинетики межфазных процессов [Текст] / А. Н. Николаенко // Почвоведение. – 1987. - №5. - С. 128 - 133.
4. Николаенко, А. Н. Математическое описание физико-химических процессов азотно-солевого комплекса почв [Текст] / А. Н. Николаенко // Доклады РАСХН. – 2002. - №2. - С. 38 - 41.
5. Николаенко, А. Н. Изучение кинетики сорбции иона кальция из раствора солонцовой почвой методом радиоактивной индикации [Текст] / А. Н. Николаенко, А. С. Пельцер // Известия ТСХА. – 1983. – Вып. 3. - С. 180 - 182.
6. Никольский, Б. П. Законы обмена между твердой фазой и раствором [Текст] / Б. П. Никольский, В. И. Парамонова // Успехи химии. – 1939. – Т. 8. - Вып. 10. - С. 14 - 17.
7. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений [Текст] / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. - М., 1978. – 457 с.
8. Чиркин, Ю. Н. Физико-химический расчет состава почвенных растворов по водным вытяжкам [Текст] / Ю. Н. Чиркин. - Автореферат диссертации... кандидата с/х наук. - Алма-Ата, 1980. – 24 с.