



УДК 519.6: 631.616

Н. М. Кащенко

КАПИЛЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ВЛАГОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ

Проводится моделирование влагопереноса в почвах в условиях работы дренажа на основе согласованного учета капиллярного описания и переноса влаги по поровой поверхности.

Moisture transport in soils under conditions of drainage on the basis of an agreed account of the capillary and the description of moisture transfer on porous surfaces is simulated.

111

Ключевые слова: математическое моделирование, влагоперенос, дренажные системы, капилляры, поровая поверхность.

Key words: mathematical modeling, water transfer, drainage systems, capillaries, pore surface.

Введение

Мелиоративные системы польдерного типа применяются при сельскохозяйственном освоении малосклонных и безуклонных территорий. Для них характерна неравномерность осушения массива в процессе взаимодействия уровней воды в каналах проводящей сети с уровнями грунтовых вод дренажных систем и являющаяся результатом не учтенных при проектировании параметров каналов проводящей сети, дренажа и насосно-силового оборудования особенностей формирования стока.

Основанное на экспериментальных данных моделирование польдерных систем выявило взаимосвязь их параметров [1], что требует точной детализации методов расчета дренажа в динамическом режиме работы его в периоды осушения и в периоды дефицита влаги. Для этого учтем ограниченность диффузионного приближения, применяемого обычно для описания движения влаги в насыщенной и ненасыщенной зонах, и используем представление о почвах как фрактальных структурах, учтем капиллярность почв и пленочные явления [2].

1. Математическая модель влагопереноса

Экспериментальные исследования переноса влаги по пленкам (табл. 1) взяты из [3]. Пусть h — толщина пленки (м), $V_{\max}(h)$ — скорость релаксации; тогда одна из эмпирических формул для скорости релаксации, полученная обработкой данных таблицы 1 с применением метода наименьших квадратов, имеет вид (h_s выражено в слоях молекул воды):

$$V_{\max}(h_s) = 0,62 + 45,0 \exp\left(-\frac{2,4}{h_s - 0,8}\right). \quad (1)$$



Данные исследований переноса влаги по пленкам

Количество молекулярных слоев	Измеренное время релаксации (с)	Толщина пленки (А°)	Скорость релаксации (м/с)	Аппроксимация скорости (м/с)
1	5,0·10 ⁻¹⁰	3,1	0,620	0,620
2	5,0·10 ⁻¹¹	6,2	6,200	6,710
4	2,2·10 ⁻¹¹	12,4	14,091	21,877
10	7,7·10 ⁻¹²	31,0	40,260	35,287

112

При движении по пленкам диссипация существенна; используем диффузионное приближение для вертикального влагопереноса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(S \cdot K(h) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\theta}{S} \right) \right) + \frac{1}{\tau_p} \left(1 - \frac{\theta}{S \cdot h_0} \right), \quad (2)$$

где S — площадь пленки в единичном объеме, м²/м³; θ — относительная влажность; τ_p — скорость влагообмена между пленкой и капиллярным объемом, с; h_0 — толщина пленочной влаги, м; $K(h)$ — коэффициент диффузии, м²/с; τ_p , h_0 , $K(h)$ определяются через указанные данные.

Капиллярный перенос влаги описывается системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} \left(\mu_0 - \sum_{i=1}^n \mu_i \right) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \left(\int_{H_d - kL_d}^H K_\phi(z) dz \cdot \nabla H \right) + \xi - \sum_{i=1}^n \mu_i f_i + V_p \left(1 - \frac{h}{h_0} \right), \\ \frac{\partial H_i}{\partial t} = f_i, \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (3)$$

где H — уровень грунтовых вод, м; μ_0 — коэффициент водоотдачи; μ_i — относительный объем капилляров; $K_\phi(z)$ — скорость фильтрации в зависимости от уровня z , м/с; L_d — расстояние между дренами, м; k — коэффициент «висячести»; ξ — суммарный приток и отток, м/с; H_i — уровень воды в капиллярах, м; $f_i = V_{ki} \frac{H_{ki} + H - H_i}{H_i - H}$; V_{ki} — скорость капиллярного подъема, м/с; H_{ki} — высота капиллярного подъема, м; h_0 — толщина пленки; V_p — скорость влагообмена между пленочной и капиллярной влагой. Последние слагаемые в (2) и (3) добавляются для описания влагообмена между пленкой и капиллярной водой.

2. Результаты численного моделирования

На рисунке 1 приведены результаты расчетов на этих моделях формирования водоотдачи с использованием систем уравнений (2, 3) и экспериментальные данные, полученные И. Калюжным [5] на почвенных колонках при разных скоростях снижения напора.

Система (2–3) для расчета переноса влаги в почве для низких значений влажности применялась с учетом экспериментальных данных [6]. Приведем рассчитанную динамику изменения влажности при начальных условиях (рис. 2):



а) влажность в слоях 0–10, 20–30, 40–50, 60–70 см – 10 % объема пространства, в слоях 10–20, 30–40, 50–60 см – 3 %;

б) влажность в слоях 0–10, 20–30, 40–50, 60–70 см – 25 % объема пространства, а в слоях 10–20, 30–40, 50–60 см – 8 %.

Хорошее качественное совпадение рассчитанных профилей влажности с экспериментальными данными говорит о качестве результатов при расчете параметров управления работой польдерных систем в периоды дефицита влаги.

Основные потоки влаги в корневую систему растений определяются свободной, или гравитационной, влагой, которая за счет сил поверхностного натяжения формирует капиллярную кайму, однако ее формирование зависит от динамики движения влаги по пленкам. Данные на рисунке 2 показывают, что скорость подъема капиллярной каймы фактически не зависит от начальной влажности почвы. Расчеты динамики формирования капиллярной каймы с использованием (2–3) дают хорошую сходимость расчетов и экспериментальных данных [6].

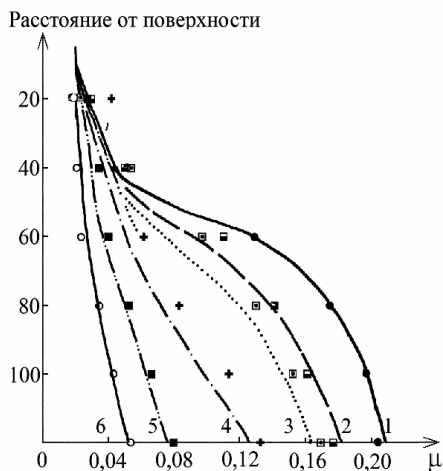


Рис. 1. Рассчитанные и фактически [5] значения динамической водоотдачи (μ) для различных скоростей снижения напоров на колонке:

2, \square – 0,025 см/мин; 3, \square – 0,056 см/мин;
4, + – 0,25 см/мин; 5, \blacksquare – 1,0 см/мин; 6, о – 1,5 см/мин; 1, \bullet – предельный профиль при малой скорости снижения напора

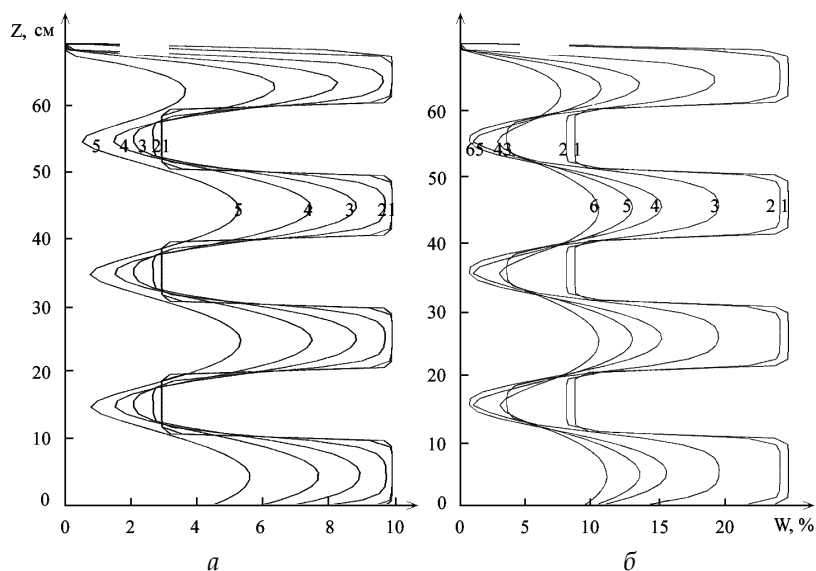


Рис. 2. Рассчитанные профили влажности $W(z)$ для условий модельных экспериментов [6]: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – временная динамика формирования рассчитанных профилей влажности почвы



Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Применение в расчетах согласованных моделей движения влаги по пленкам и капиллярам дает хорошее совпадение рассчитанных данных с экспериментом.

2. Использование в расчетах структуры порового пространства почвы в виде пучка капилляров с характеризующим его спектром распределения пор является приемлемой формализацией процессов влагопереноса, позволяет упростить процедуры расчета, основанные на моделях порового пространства, и может быть использовано для моделирования работы польдерных систем в режиме осушения.

Список литературы

1. Кащенко Н. М., Ковалев В. П. Расчет линейных польдерных систем // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования: материалы Международной конференции. М., 2007. С. 195–200.

2. Нерпин С., Хлопотенков Е. Обобщение закона Дарси для случаев нелинейной фильтрации в ненасыщенных и насыщенных грунтах // Доклады ВАСХНИЛ. 1970. №11. С. 3–17.

3. Бобров П. П., Беляева Т. А., Бобров А. П. и др. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости почв с различным содержанием гумуса // Труды XX всероссийской науч. конф. «Распространение радиоволн». Н. Новгород, 2002. С. 241–242.

4. Кащенко Н. М. Процессы влагопереноса в пористых средах // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 10. С. 56–58.

5. Калюжный И. Л., Павлова К. К. Экспериментальные исследования процесса водоотдачи почвы при различных скоростях изменения уровня грунтовых вод // Труды ГГИ. 1980. Вып. 268. С. 39–50.

6. Дмитриев С. И., Нечаев В. К. К вопросу о применимости уравнения диффузии для изучения явления влагопроводности в почвогрунтах // Труды ЛГМИ. 1962. Вып. 13. С. 46–54.

Об авторе

Николай Михайлович Кащенко — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: kaschtschenko@mail.ru.

Author

Dr Nikolay Kashchenko — assistant professor, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: kaschtschenko@mail.ru.