



И.В. Пилецкий

Математическое моделирование водного режима культурного ландшафта

Одним из структурных элементов белорусского ландшафта являются торфяные почвы, созданные в результате осушения болот. Их эффективное использование сопряжено с рядом трудностей. Так, ветровая эрозия, заморозки, пожары, сильная засоренность сорняками ведут к падению плодородия почвы и тем самым существенно снижают продуктивность выращиваемых культур. Добавив сюда еще и имеющиеся трудности с регулированием водного, воздушного, питательного и теплового режимов этих почв, становится очевидным необходимость отыскания таких приемов и методов мелиоративного воздействия на мелкозалежные торфяные почвы, которые если и не устраняли все это, то максимально уменьшали бы их. В решении этой проблемы положительный эффект дает «Немецкая песчано-смешанная культура земледелия», которая в нашей республике имеет названия: глубокая вспашка торфяников, трансформация торфяных почв, структурная мелиорация.

Сущность этого мероприятия заключается в разработке почвенной толщи на глубину, превышающую мощность торфа, специальным плугом с укладкой чередующихся слоев торфа и подстилающего песка под углом 45° . В ходе этого приема при наличии оглеенного контактного горизонта (сплошного или в виде линз) происходит его разрушение, что также существенно улучшает водный режим корнеобитаемого слоя. При сельскохозяйственном освоении в верхней части слоистого профиля формируется горизонт со сравнительно однородной по площади структурой. В результате образуется новый тип антропогенного ландшафта, не имеющего аналогов в природе.

В настоящее время, отсутствие научных разработок по особенностям формирования водно-воздушного режима вышеназванных почв затрудняет проведение оптимизации водного режима культурного ландшафта.

На практике одномерный нестационарный влагоперенос в почве описывается с помощью диффузионного уравнения [1].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_B(\Phi) \frac{\partial}{\partial x} (\Phi(\theta) - g_x) \right) \pm R$$

в котором: $\Phi(\theta)$ и $K_B(\Phi)$ – экспериментально определяемые гидрофизические характеристики почвы (зависимость капиллярного потенциала влаги от влажности и зависимость влагопроводности от потенциала влаги) ландшафта;

g – ускорение свободного падения тела;

R – сток или источник.

В последнее время известны методы определения гидрофизических характеристик почвогрунтов в полевых и лабораторных условиях. Разработаны и численные методы решения уравнения влагопереноса для различных краевых условий [2,3]. Тем не менее, они еще не нашли широкого применения в проектировании и эксплуатации осушительно-увлажнительных систем. Причин здесь несколько: это необходимость экспериментального определения гидрофизических характеристик почв; переподготовка специалистов; использование ЭВМ, а также наблюдаемое в ряде случаев существенное расхождение результатов расчета и экспериментальных данных. Несоответствие между результатами расчета и экспериментальными данными может быть вызвано использованием при расчетах гидрофизических характеристик, не отвечающих водно-физическим свойствам торфа на время эксперимента. В связи с этим исследователи Афанасик Г.И., Давыдовский П.Н., Чураев Н.В. и др. изучали изменения гидрофизических характеристик торфяных почв под влиянием их уплотнения, переработки, промораживания, попеременного осушения-увлажнения [4,5,6].

В последнее время были предприняты попытки разработать схему расчета водного режима, которая сочетала бы в себе простоту обычной балансовой схемы и выходную информативность схемы, базирующейся на использовании уравнения влагопереноса. Эти расчетные модели способствуют быстрейшему внедрению математических методов прогноза в инженерную практику.

С разработкой численных методов решений уравнений возникли возможности для усовершенствования упомянутой модели [3].

Множество методик разработано для определения параметров влагопереноса по результатам статических и динамических опытов, проводимых в лабораториях и полевых условиях [7]. Исследователи Van Yenchten M.Th., Davidson G.M., Wierenga R.G. считают, что такое большое количество параметров, приводимых в соответствие с экспериментальными данными, исключают возможность однозначной идентификации модели с описываемым ею процессом влагопереноса.

Анализ литературы показывает, что процессы переноса влаги в зоне аэрации зависят от многих факторов, которые определяются внешними воздействиями, свойствами почвы, поглощением влаги корневой системой, климатом, сельскохозяйственным использованием почвы, режимом осадков, уровнями грунтовых вод (УГВ) и элементами питания.

Большое количество воздействующих факторов не только представляет широкие возможности для регулирования процессов влагопереноса в трансформированных мелкозалежных торфяниках, но и предопределяет необходимость применения для этих целей математического моделирования. А между тем, проведенный анализ научных разработок по проблеме приводит к выводу о слабой изученности процессов массопереноса структурных почв. В частности, вызывает определенную сложность определение водно-физических свойств трансформированных торфяников в динамике, подпитывание в корнеобитаемый слой от УГВ, перераспределение влаги между слоями, физико-химических взаимодействий, поглощение влаги корневой системой и т.д., без чего невозможно разработать математические модели, пригодные для оперативного прогнозирования водного и пищевого режимов этих почв.

В связи с этим для выяснения влияния различной толщины слоев, величин погодных возмущений, а также свойств грунтов на влагообмен в зоне аэрации нами использовалось имитационное моделирование процесса влагопереноса, позволяющее путем постановки численных экспе-

риментов более эффективно рассчитывать водный режим. В рамках рассматриваемой модели нами сделано допущение о том, что в двух сопряженных слоях макроструктуры глубоко вспаханного мелкозалежного торфяника формируется двумерное поле потенциалов влажности, периодически повторяемое в следующих парных слоях. Начало координат выбрано на поверхности почвы, ось Z – направлена вертикально вниз, ось X – горизонтальная.

С учетом вышеизложенных допущений изменения влажности почвы, влагообмен в зоне аэрации описываем следующим уравнением [8]

$$e \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_B(X, Z) \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_B(X, Z) \frac{\partial}{\partial z} (\Phi - gZ) \right) \quad (1)$$

где t – время;

Φ – капиллярный потенциал влаги, обусловленный поверхностными силами на границе раздела фаз и силами взаимодействия воды с частицами почвы;

gZ – гравитационный потенциал, характеризующий положение объема воды в поле силы тяжести;

g – ускорение силы тяжести;

Z – вертикальная координата;

X – горизонтальная координата;

$e(\Phi)$ – дифференциальная влагоемкость ($\frac{\partial W}{\partial \Phi} = e$);

W – влажность почвы;

K_B – коэффициент влагопроводности почвы.

Область изменения Z и X обозначим через L

$$D = \{ 0 \leq Z \leq H, 0 \leq X \leq \Delta \}$$

Опишем более подробно структуру коэффициентов уравнения $e(\Phi)$ и $K_B(\Phi)$:

$$K_B(\Phi) = \begin{cases} K_1(\Phi) & \text{при } 0 \leq Z < 0,2 \quad 0 \leq X \leq L \\ K_2(\Phi) & \text{при } Z > 0,2 \quad I \leq 0 \\ K_3(\Phi) & \text{при } Z > 0,2 \quad I > 0 \end{cases}$$

$$\text{где } I = X + (Z - 0,2) - (a + b) \left[\frac{X + (Z - 0,2)}{a + b} \right] - a$$

$$e(\Phi) = \begin{cases} e_1(\Phi) & \text{при } 0 \leq Z < 0,2 \quad 0 \leq X \leq L \\ e_2(\Phi) & \text{при } Z > 0,2 \quad I \leq 0 \\ e_3(\Phi) & \text{при } Z > 0,2 \quad I > 0 \end{cases}$$

Определения значений K_n , e_n в машинном эксперименте базировались по следующим функциональным зависимостям:

$$K_n(\Phi) = K_{0n} \exp(-b_n \Phi), \quad e_n(\Phi) = \frac{a_n}{1 + C_n(\Phi - d_n)^2}$$

c_n, d_n, a_n, b_n – коэффициенты аппроксимации эмпирической зависимости дифференциальной влагоемкости.

На рисунке 1 представлена область D с указанными зонами 1, 2, 3. ($h_x \approx 0,05$ м) $L = 2a + 2b + h_x$,

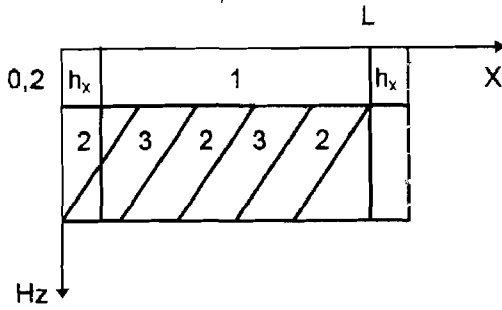


Рис. 1. Схема моделируемых почвенных слоев.

a – ширина наклонного слоя песка; b – ширина наклонного слоя торфа.

Задачи решали при следующих краевых условиях:

$$-K_{B1} \frac{\partial}{\partial z} (\Phi - gZ) \Big|_{z=0} = i(t) \quad (2)$$

$$\Phi \Big|_{z=H} = 0 \quad (3)$$

$$\Phi(z, x, t) \Big|_{\substack{x=0 \\ 0 \leq z \leq H}} = \Phi(z, x, t) \Big|_{\substack{x=2a+2b \\ 0 \leq z \leq H}} \quad (4)$$

$$\Phi(z, x, t) \Big|_{\substack{x=h_x \\ 0 \leq z \leq H}} = \Phi(z, x, t) \Big|_{\substack{x=2a+2b+h_x \\ 0 \leq z \leq H}} \quad (5)$$

при $0 \leq t \leq T$ и начальном условии

$$\Phi(z, x, t) \Big|_{t=0} = \varphi(z, x) \quad (6)$$

Условия (4) и (5) предполагают периодичность $\Phi(z, x, t)$ по оси X с периодом $L_1 = L - h_x$ т.е. $\Phi(z, x + L_1, t) \equiv \Phi(z, x, t)$.

$i(t) = P - E_p$ представляется в виде кусочно постоянной функции, где интервал постоянства функции равен одним суткам. P – осадки; E_p – испарение.

Для численного решения задачи (1-6) применяли неявную итерационную конечно-разностную схему на пятиточечном шаблоне [9]. Для разра-

ботанного алгоритма О.Р.Армоником разработана программа на языке ФОРТРАН-IV и проведен счет конкретных вариантов.

Прежде всего, была сделана замена переменной $U = \Phi - gZ$, так как для новой переменной U на линиях разрыва выполняются условия непрерывности ее и потока. Далее, выбрав равномерную сетку по X и Z с шагом h_x по X и h_z по Z (где $h_z = \frac{H}{N_z}$, $h_x = \frac{L}{N_x}$, $N_z + 1$ – число узлов на оси Z , $N_x + 1$ – на оси X) задача (1-6) в разностном виде будет иметь следующий вид:

$$e_{ij}^S \frac{\bar{u}_{ij}^{S+1} - u_{ij}}{\tau} = \frac{1}{h_z} \left(K_{i+1/2,j}^S \frac{\bar{u}_{i+1,j}^{S+1} - \bar{u}_{i,j}^{S+1}}{h_z} - K_{i+1/2,j}^S \frac{\bar{u}_{ij}^{S+1} - \bar{u}_{i,j}^{S+1}}{h_z} \right) + \frac{1}{h_x} \left(K_{i,j+1/2}^S \frac{\bar{u}_{i,j+1}^{S+1} - \bar{u}_{i,j}^{S+1}}{h_x} - K_{i,j-1/2}^S \frac{\bar{u}_{ij}^{S+1} - \bar{u}_{i,j-1}^{S+1}}{h_x} \right) \quad (1')$$

$$K_{1/2}^S \left(\frac{\bar{u}_{2,j}^{S+1} - \bar{u}_{1,j}^{S+1}}{h_z} - g \right) = i(t) \quad (2')$$

$$\bar{u}_{N_z+1,j}^{S+1} + gH = 0, \quad i = \overline{2, N_z} \quad (3')$$

$$\bar{u}_{i1}^{S+1} = \bar{u}_{i,N_x}^{S+1} \quad (4')$$

$$\bar{u}_{i2}^{S+1} = \bar{u}_{i,N_{x+1}}^{S+1}, \quad i = \overline{1, N_{z+1}} \quad (5')$$

$$u_{ij} = \varphi((i-1)h_z, (j-1)h_x) - g(i-1)h_z, \quad (6')$$

$$i = \overline{1, N_{z+1}}, j = \overline{1, N_{x+1}}$$

где $e_{ij}^S = c(\Phi_{ij}^S) = c(\bar{u}_{ij}^S + g(i-1)h_z)$, а \bar{u}_{ij}^S – значение искомой функции $u(Z, X, t)$ в точке $Z = (i-1)h_z$, $X = (j-1)h_x$, $t = t_0 + \tau$, и на s -той итерации.

Аналогично определялось K_{ij}^S и $K_{i+1/2,j}^S = \frac{K_{i+1,j}^S + K_{ij}^S}{2}$, а u_{ij} – значение функции $u(z, x, t)$ на предыдущем временном слое, т.е. при $t = t_0$.

Полученная в (1)¹ - (5)¹ система линейных уравнений относительно u_{ij}^{S+1} решалась путем сочетания ряда преобразований и итераций. Выход из итерационного процесса при решении системы линейных уравне-

ний происходил по условию $\max_{ij} |\Delta_{ij}| < \varepsilon_1$, а для определения $u_{ij}(t + \tau)$ по условию

$$\max_{ij} |\bar{u}_{ij}^{S+1} - u_{ij}^S| < \varepsilon_2$$

Погрешность схемы аппроксимаций $\Delta = \tau + h_z^2 + h_k^2$.

Параметры, использованные для эксперимента, вытекают из условия высокоэффективного плодородия новой почвы, т.е. оптимальным соотношением в почвенном профиле минеральной и органической частей. Этот показатель определяет водно-физические, агрохимические и технологические свойства почвы. Поэтому количество торфа и его свойства, определяющие здесь содержание влаги и воздуха, поглощение и удержание питательных веществ учитываются в построенной нами математической модели расчета водного режима трансформированных мелкозалежных торфяников. В конечном счете разрешение модели позволит определить, в первую очередь, выбор наиболее оптимальных соотношений между слоями песка и торфа с целью создания нормального водного режима в корнеобитаемом слое, установление оптимальных режимов УГВ и других факторов культурного ландшафта. Следует отметить, что экспериментальным путем решить указанные вопросы весьма сложно, и то лишь для ограниченного числа вариантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сиротенко О.Д.** Математическое моделирование водно-топливного режима и продуктивности агроэкосистем. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С.167.
2. **Афанасик Г.И., Финский А.И.** Использование потенциальной теории движения влаги для расчетов влагопереноса в осушаемых почвогрунтах. // Мелиорация переувлажненных земель. Тр. Бел НИИМивХ, 1973, т.21. С.119-124.
3. **Сабнин В.И.** Численное решение задач фильтрации грунтовых вод с зоной неполного насыщения. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1982. С.15.
4. **Афанасик Г.И.** Исследование водно-теплового режима низинных торфяников в зимний период.: Автореф. дис. канд. тех. наук. - Мн. 1965. С. 18.
5. **Давыдовский П.Н.** Исследование термовлагопроводности в торфяных системах с помощью изотопов.: Автореф. дис. канд. тех. наук. - Мн. 1965. С. 20.
6. **Чураев Н.В., Святцев М.И.** Зависимость потенциала влаги торфов от влагосодержания и степени уплотнения.// Почвоведение. 1978 г. №5. С. 103-110.
7. **Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород.** Под ред. Веригина Н.Н. - М.: Недра, 1971.С. 271.
8. **Афанасик Г.И., Армоник О.Р., Скворцов Н.Г.** Решение задач прогноза водного режима на ЭВМ. - Экспресс - информация. Минводхоз СССР, Сер. 2, Осушение и осушительные системы, 1991 г., вып. 9. С. 23-25.
9. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. - М.: 1977. С. 656.

SUMMARY

Taking as a basis the analysis of literary sources the author considers in the dynamics the problem of building up mathematical models of peat soils moisture transference. An attempt of building up a mathematical model of optimising the whater rezime of the transformed shallow-lain peatflogs of a cultural land-seape has been made.