

УДК 631.616:621.72.00157

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ

В.А. Наумов, В.П. Ковалев*, В.Г. Пунтусов**

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,
Россия, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
E-mail: van-old@rambler.ru

*ООО «Бюро мелиоративных технологий», Россия, 236039, г. Калининград,
ул. Чаадаева, 25-36
E-mail: bmt.polder@mail.ru

**ФГБУ «Управление «Калининградмелиоводхоз»»,
Россия, 236022, г. Калининград, ул. Космонавта Леонова, 18
E-mail: amber7@baltnet.ru

Сформирована математическая модель польдерной системы. С помощью экспериментальных исследований и математического моделирования показана тесная нелинейная взаимосвязь между параметрами элементов, составляющих польдерную систему: дренажа, каналов проводящей сети и насосной станции. Предложен инженерный метод разработки проекта линейной польдерной системы.

польдерная система, неравномерность осушения, модуль стока, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация польдерных систем показала эффективность управления водным режимом почв осушаемых массивов. Однако для обеспечения стабильно высокого уровня урожайности агрокультур необходима равномерность осушения. Так, для действующих польдерных систем Неманской низменности установлено уменьшение интенсивности снижения уровней грунтовых вод ($i_{гв}$) с удалением от створа насосной станции (L). Для польдерной системы № 15 эта зависимость имеет следующий вид: $i = 6,2 \exp(-0.00026L)$.

Анализ экспериментальных данных показал, что неравномерность осушения является результатом несогласованной работы составляющих систему элементов: дренажа, каналов проводящей сети и насосной станции, расчет параметров которых при проектировании произведен без учета времени добегания дренажного стока к створу насосной станции [1-3].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Применение математического моделирования дает возможность проводить расчеты польдерных систем с учетом всех их элементов без исключения. Так, движение воды в каналах проводящей сети описывается системой уравнений Сен-Венана в виде (см., например, [3]):

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q |Q|}{\Theta_k^2} \right) = 0, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \xi \end{cases} \quad (1)$$

где $Q(x,t)$ – расход воды, м³/с; $W(x,t)$ – площадь поперечного сечения, м²; $h(x,t)$ – уровень поверхности воды, м; $\xi(x,t)$ – локальный боковой приток, м²/с; g – ускорение силы тяготения Земли, м/с²; $\Theta_k = WC_k \sqrt{R_k}$ – модуль расхода, м³/с; C_k – коэффициент Шези, м^{1/2}/с; R_k – гидравлический радиус, м.

Для расчета движения в дренажных трубах воды с переменной массой использовано уравнение Коновалова-Петрова, которое для напора $h_d(y)$ имеет вид:

$$\frac{\partial h_d}{\partial y} = \frac{2\alpha}{gW_d^2} qQ_d + \frac{Q_d |Q_d|}{\Theta_d^2}, \quad (2)$$

где $y \in [0; L]$ – координата, направленная вдоль дрены, м; L – длина дрены, м; W_d – площадь сечения дрены, м²; α – коэффициент продольной неравномерности скорости движения воды в дрене; $\Theta_d = W_d C_d \sqrt{R_d}$ – модуль расхода, м³/с; R_d – гидравлический радиус дрены, м; C_d – коэффициент Шези для дрены, м^{1/2}/с; Q_d – суммарный сток воды на отрезке $[y; L]$, $Q_d = \int_y^L q(y) dy$, м³/с; q – фильт-

рационный приток, $q = \frac{2\pi K_\phi}{\Phi} (H - h_d)$, м²/с; K_ϕ – скорость фильтрации, м/с; H – уровень грунтовых вод, отсчитываемый от поверхности почвы, м; h_d – напор в дрене, м; Φ – фильтрационные сопротивления на входе в дрину.

Система уравнений переноса влаги в насыщенной и ненасыщенной зонах почвы междренной полосы, рассчитываемого с учетом распределения почвенных пор по диаметрам для этих условий, получена в [4,5]:

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

где H – уровень грунтовых вод, м; μ_0 – коэффициент водоотдачи; d_i – диаметр капилляров, м; μ_i – относительный объем капилляров диаметром d_i ; $K_\phi(z)$ – скорость фильтрации в зависимости от уровня z , м/с; L_d – расстояние между дренами, м; H_d – уровень заложения дрен, м; L_d – междреннее расстояние, м; H_i – уровень воды в капиллярах диаметром d_i , м; $f_i = V_{ki} \frac{H_{ki} + H - H_i}{H_{ki}}$; V_{ki} – скорость капиллярного подъема в капиллярах диаметром d_i , м/с; H_{ki} – высота капиллярного подъема в капиллярах диаметром d_i , м.

Хорошее количественное совпадение рассчитанных значений профилей влажности в [5] с экспериментальными данными и качественное соответствие

рассчитанных профилей влажности условиям экспериментов позволяет применить систему уравнений (3) при расчете параметров дренажа польдерных систем.

ПРИВЕДЕНИЕ ПОЛЬДЕРНОЙ СИСТЕМЫ К ЛИНЕЙНОМУ ВИДУ

Приведение польдерной системы к линейному виду осуществляется с использованием инженерного решения, основанного на необходимости учета в параметрах проводящей сети времени добегающего дренажного стока к створу насосной станции и заключающегося в размещении в каналах проводящей сети, под горизонтами заложения дренажа, объемов добегающего стока. Объемы добегающего стока рассчитываются с использованием интеграла Дюамеля, адаптированного для топологии польдерной системы и используемого в качестве специальных граничных условий, задаваемых вдоль каналов проводящей сети в следующем виде:

$$W_{вл.пл.i} = q_{др.с.i} F_{др.с.i} \tau_i, \quad W_{вл.кан.k} = \sum_{i_k} W_{вл.пл.i_k}, \quad W_{вл.польд} = \sum_k W_{вл.кан.k}, \quad (4)$$

где $q_{др.с.i}$ - модуль стока, принятый для расчета дренажа, м/с; $F_{др.с.i}$ - площадь единичной дренажной системы, м²; τ_i - время добегающего от единичной дренажной системы к створу насосной станции, с; i_k - множество номеров дренажных систем, подсоединенных к k -му каналу; $W_{вл.пл.i}$ - объемы добегающего для отдельных каналов; $W_{вл.кан.k}$ - объемы добегающего для групп каналов; $W_{вл.польд}$ - объемы добегающего для польдерной системы в целом.

Характерное время польдерной системы ($t_{нс} = \tau_{max} = L_{max} / V_{max}$) определяет время снижения напоров на дренаже до горизонтов его заложения, задавая режим работы и параметры: расстояние между дренами, диаметр дрен и глубину заложения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ

Численное моделирование работы польдерных систем было выполнено для площадей от 250 до 6000 га. Рельеф осушаемого массива представлен не имеющим уклона. Длина каналов $L_{кан}$ составляла от 5000 до 50000 м. Дрены приняты длиной $L_{др} = 500$ м, диаметром $d_{др} = 0,1$ м и глубиной залегания $H_{др} = 1,3$ м. Используемые в расчетах значения параметров $\Phi = \Phi_0 + \Phi_i$ взяты по формуле Н. Эфендиева и экспериментальным данным [6]. Грунты с коэффициентами фильтрации $K_\phi = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м/с на глубине 1,3 м подстилаются водоупором. Расчеты проводились с использованием дифференциальных уравнений (1)-(3) и специальных граничных условий (4).

Проведенные численные эксперименты показали, что в открытых каналах польдерных систем длиной до 50 000 м уклоны свободной поверхности воды для момента времени, равного $t_{нс}$, принимают приемлемые для практики расчета значения. Для канала длиной 15 км уклон имеет значение $I_{кан} = 0,000004$. Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены на рис.1.

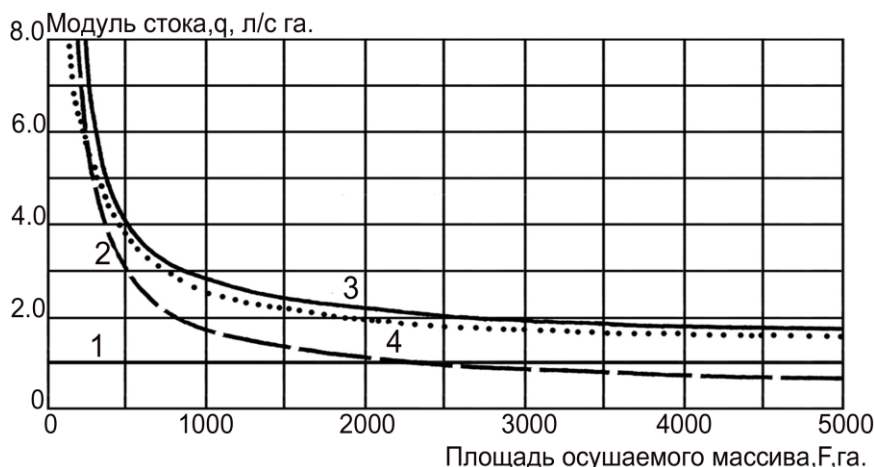


Рис. 1. Производительность насосной станции: 1 - составляющая откачки канала $Q_{кан}$; 2 - составляющая откачки дренажного стока $Q_{др}$; 3 и 4 - $Q_{нс} = Q_{кан} + Q_{др}$; 3 - результаты расчета при моделировании; 4 - по опытным данным [6]
 Fig. 1. Productivity of pump station: 1 - a component of pumping out of channel $Q_{кан}$; 2 - a component of pumping out of drainage drain $Q_{др}$; 3 and 4 - $Q_{нс} = Q_{кан} + Q_{др}$; 3 - results of calculation at modeling; 4 - under the skilled data [6]

Расчетная производительность насосной станции польдерной системы определяется зависимостью:

$$Q_{нс} = Q_{кан} + Q_{др} = \frac{V_{кан}}{t_{нс}} + q_{др} F, \quad (5)$$

где $Q_{кан} = \frac{V_{кан}}{t_{нс}}$ - составляющая для откачки воды из канала;

$Q_{др} = q_{др} F$ - составляющая для откачки дренажного стока; $V_{кан}$ - объем канала от поверхности почвы до минимального горизонта откачки, m^3 ; $t_{нс}$ - характерное время польдерной системы, с.

Экспериментальные значения производительности насосной станции рассчитаны по зависимости [1]

$$q_{нс} = \frac{q_{др}}{1 - \varphi}, \quad (6)$$

где $q_{нс}$ - модуль стока для расчета производительности насосной станции, м/с; $q_{др}$ - модуль дренажного стока, м/с; $\varphi = \frac{13.8}{(10000F + 450)^{0.43}}$ - коэффициент редукиции стока; F - площадь осушаемого массива, m^2 .

Приведенные на рис. 2 графики зависимости величин междренных расстояний от размеров площади осушаемого массива соответствуют условию достижения расчетного значения модуля дренажного стока $q_{др}$ на горизонтах заложения дренажа.

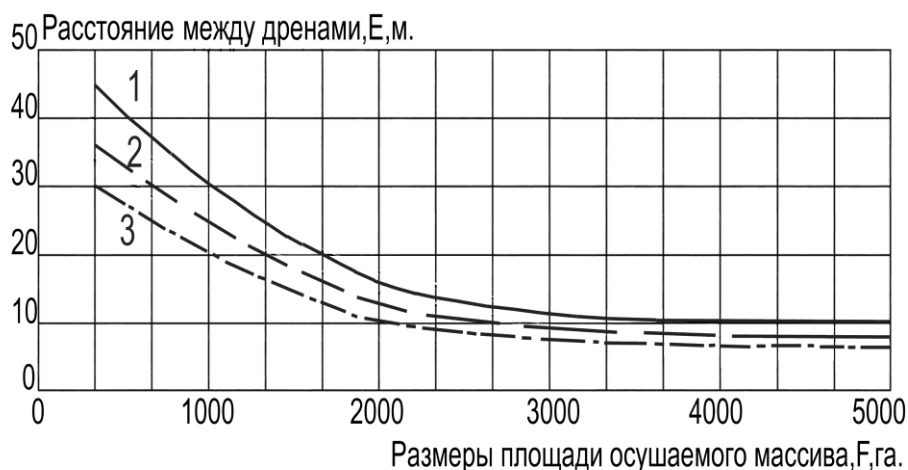


Рис. 2. Зависимость расстояний между дренами от площади осушаемого массива полевой системы с динамическим режимом изменения величины водоотдачи для 1 – $q_{dp} = 0,8$ л/с га; 2 – $q_{dp} = 1,0$ л/с га; 3 – $q_{dp} = 1,2$ л/с га
 Fig. 2. Dependence of distances between drains from the area of a drained file полевой системы with a dynamic mode of size change of water return for 1 – $q_{dp} = 0,8$ l/s hectare; 2 – $q_{dp} = 1,0$ l/s hectare; 3 – $q_{dp} = 1,2$ l/s hectare

Близость рассчитанных и полученных с использованием экспериментальных значений производительностей насосных станций доказывает, что учет времени добегания стока в расчетах параметров составляющих полевую систему элементов является необходимым условием расчета и проектирования полевых систем.

Анализ опытных данных и результатов численных экспериментов показывает, что для полевых систем характерно наличие тесной связи параметров составляющих полевую систему элементов между собой и с площадью осушаемого массива. Из этого следует, что расчет параметров дренажа, каналов проводящей сети, производительности насосной станции полевых систем должен осуществляться только в едином комплексе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Филатов, В.А. Расчёт основных параметров полевых систем / В.А. Филатов, В.П. Ковалёв // Мелиорация земель Калининградской области. – Л.: Госиздат, 1987. – С. 26 - 30.
2. Ковалев, В.П. Расчет параметров линейных полевых систем / В.П. Ковалев // Мелиорация переувлажненных земель. – № 2 (54). – Минск, 2005. – С. 64 - 83.
3. Наумов, В.А. Неравномерность осушения полевой системы / В.А. Наумов, В.П. Ковалев // Особенности водохозяйственных проблем Калининградской области: сборник научных трудов КГТУ. – Калининград, 2007. – С. 85 - 91.

4. Кашенко, Н.М. Фрактальная модель фильтрации в условиях работы дренажа / Н.М. Кашенко // Вестник БФУ им. И. Канта. – 2010. – № 4. – С. 158 - 162.

5. Математическое моделирование процессов фильтрации влаги в тяжелых грунтах / Н.М. Кашенко [и др.] // Вестник БФУ им. И. Канта. – 2012. – № 10. – С. 50 - 53.

6. Месюк, В.М. Осушительное действие гончарных дрен новых конструкций / В.М. Месюк, В.Т. Климков // Мелиорация и водное хозяйство. - Вып. 5. – Минск: Ураджай, 1983. – С. 4 - 9.

THE MATHEMATICAL MODELLING APPLICATION FOR PERFECTION OF POLDER SYSTEMS DESIGN CALCULATIONS

V.A. Naumov, V.P. Kovalev, V.G. Puntusov

The mathematical model of a polder system is generated. By means of experimental researches and mathematical modelling the close nonlinear interrelation between parametres of the elements making пolderную system is shown: a drainage, channels of a spending network and pump station. The engineering method of working out of the project linear polder system is offered.

polder system, non-uniformity drainage, the drain module, mathematical model