

УДК 631.616:621.72

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н. М. КАЩЕНКО

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
г. Калининград, Россия, 236015*

В. П. КОВАЛЕВ

*ООО «Бюро мелиоративных технологий»,
г. Калининград, Россия, 236015, e-mail: bmt.polder@mail.ru*

В. В. ВАСИЛЬЕВ

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407*

(Поступила в редакцию 08.10.2018)

Анализ многолетних системных экспериментальных исследований, проведенных на пolderных системах Неманской низменности, и результатов численных экспериментов позволил сформулировать основные принципы расчета и проектирования реконструкции действующих и строительства новых пolderных систем, обеспечивающих соответствующую расчетным значениям работу дренажа пolderных систем на всем массиве систем при применении в сельскохозяйственном производстве многопольного севооборота. Выбор типа многопольного севооборота пolderной системы и ее конструктивное исполнение осуществлялся на основе оценки экономической целесообразности его использования. Равномерность осушения массива системы достигается путем введения в параметры каналов проводящей сети объемов добега дренажного стока от составляющих водосбор пolderной системы дренажных систем к створу насосной станции, рассчитываемых с использованием адаптированного к топологии пolderной системы интеграла Дюамеля. Математическая модель пolderной системы состоит из уравнений, описывающих работу отдельных элементов пolderной системы, и включает уравнения фильтрации грунтовых вод, уравнения течения воды в дренах и уравнения течения воды в канале. Проведение реконструкции действующих пolderных систем, с учетом определения типа многопольного севооборота, размеров площади отдельных полей севооборотов, основанных на данных фактических значений модулей дренажного стока систем, даст возможность минимизировать затраты при эксплуатации пolderных систем.

Ключевые слова: *пolderная система, равномерность осушения, математическая модель.*

The analysis of long-term systemic experimental studies conducted on the Neman lowland polder systems and the results of numerical experiments made it possible to formulate the basic principles for calculating and designing the reconstruction of existing and building new polder systems that ensure the drainage work of polder systems, corresponding to the calculated values, on the entire array of systems used in agricultural production of multi-field crop rotation. The choice of the type of multi-field crop rotation of the polder system and its design was carried out on the basis of an assessment of economic feasibility of its use. Uniform drainage of the array of the system is achieved by introduction into the parameters of conductive network channels of the volumes of additional drainage flow from the catchment polder system of drainage systems to the gates of the pump station, calculated using the Duhamel integral adapted to the topology of a polder system. A mathematical model of a polder system consists of equations describing the operation of individual elements of a polder system, and includes the equations for filtering groundwater, the equations for the flow of water in drains, and the equations for the flow of water in a channel. The reconstruction of existing polder systems, taking into account the determination of the type of multi-field crop rotation, the size of the area of individual crop rotation fields, based on the data of actual values of the systems drainage flow modules, will make it possible to minimize the costs of operating polder systems.

Keywords: *polder system, drainage uniformity, mathematical model.*

Введение

Применение пolderных систем связано с сельскохозяйственным освоением безуклонных и малоуклонных территорий, находящихся в затопленном или подтопленном состоянии. Эффективность работы пolderных систем определяется работой насосной станции, позволяющей более корректно, по положению уровней грунтовых вод и влажности почвы массива осушения, управлять откачкой дренажного стока. В Калининградской области на Неманской низменности из 74 тысяч гектаров пolderных земель 32 820 га осушено закрытым дренажем.

Общей тенденцией развития проектирования и строительства пolderных систем, которая прослеживается и в настоящее время, является уменьшение площади массивов осушения и увеличение удельной производительности насосных станций [1, 3–5].

Проектирование дренажа польдерных систем Неманской низменности осуществлялось для выращивания трав для производства травяной муки. Смена структуры сельскохозяйственного производства обуславливает использование многопольного севооборота и предполагает перестроение топологии систем, выделение полей многопольного севооборота в индивидуальные объекты с.-х. производства со своими водорегулирующими гидротехническими сооружениями.

Основная часть

Системные экспериментальные исследования работы польдерных систем Неманской низменности проводились на польдерных системах 15, 20, 29, 35, 36, 41, 46 и на экспериментально-производственных участках «Шиповский» и «Аксеново» (польдерная система нс116а).

Проведенные системные экспериментальные исследования работы действующих систем Неманской низменности показали наличие характерной для них неравномерности осушения массива, которая приводит к снижению эффективности работы дренажа, ориентировочно до 35÷40 %, и снижению на такую же величину эффективности использования вложенных в строительство средств [1, 3–5].

Исследования работы дренажа на экспериментальных системах двустороннего действия «Шиповский» и «Аксеново» показали, что фактические значения модулей дренажного стока $q_{др.факт.} = 1.6–2.5 \text{ л/с}\cdot\text{га}$ выше их проектных значений $q_{др.факт.} = 1.1–1.2 \text{ л/с}\cdot\text{га}$. Эффективность работы дренажа польдерных систем Белорусского Полесья характеризуется величиной модуля дренажного стока в пределах $q_{др.факт.} = 0.6–1.55 \text{ л/с}\cdot\text{га}$ для нагрузок на системы в виде осадков весеннего периода в размере $h_{ос.} = 250 \text{ мм}$, можно охарактеризовать по зависимости модуля откачки от площади массива осушения в виде зависимости [2]:

$$q_{др.факт.} = 113 F^{-0.63}.$$

(1)

Дренаж польдерных систем является основным элементом систем как по назначению, так и по стоимости, около 75 % стоимости системы. Поэтому исходной задачей расчета и проектирования польдерных систем и проектирования реконструкции действующих систем, является обеспечение эффективности работы дренажа, соответствующей его проектным значениям.

Анализ многолетних системных экспериментальных исследований, проведенных на польдерных системах Неманской низменности и результатов численных экспериментов позволил сформулировать основные принципы расчета и проектирования реконструкции действующих и проектирования новых польдерных систем, обеспечивающих соответствующую расчетным значениям работу дренажа польдерных систем на всем массиве систем без исключения при применении в сельскохозяйственном производстве многопольного севооборота [1–8]:

выбор типа многопольного севооборота, определяющего величину расчетного значения модуля дренажного стока $q_{др.расч.}$ польдерной системы и ее конструктивное исполнение (осушительная, осушительно-увлажнительная, с применением орошения дождеванием), осуществляется на основе оценки экономической целесообразности его использования;

равномерность осушения массива достигается обеспечением непосредственной гидравлической связи отдельных составляющих массив осушения, дренажных систем со створом насосной станции путем учета в параметрах каналов объемов добегающего стока, рассчитываемых с использованием адаптированного к топологии польдерной системы интеграла Дюамеля;

построение топологии польдерной системы – это размещение на массиве осушения в плане и профиле составляющих систему элементов для расчета их параметров с учетом выбранного типа многопольного севооборота и принятой технологии сельскохозяйственного производства;

проведение расчета параметров, составляющих водосбор польдерной системы дренажа элементов только в нестационарном, динамическом режиме их работы с использованием методов и зависимостей, наиболее полно и точно характеризующих процессы фильтрации

влаги в почве и расчет открытых каналов с использованием трехмерного многофазного приближения;

проведение реконструкции действующих польдерных систем, определение типа многопольного севооборота, размеров площади отдельных полей севооборотов основывается на данных фактических значений модулей дренажного стока систем $q_{др.факт.}$, определяемых экспериментальным путем.

Математическое моделирование является реализуемым средством расчета параметров польдерных систем, позволяющим одновременно и с необходимой детализацией рассчитывать параметры всех составляющих польдерную систему элементов с учетом физических процессов формирования стока, определяющих взаимосвязанность их работы.

Математическая модель польдерной системы состоит из уравнений, описывающих работу отдельных элементов польдерной системы, и включает уравнения фильтрации грунтовых вод, уравнения течения воды в дренах и уравнения течения воды в канале [4–6, 8]:

Течение воды в канале описывается системой уравнений Сен-Венана и имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\xi V}{W} + g \frac{Q|Q|}{\Theta^2} &= 0 \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= \xi \end{aligned},$$

(2)

где: $Q(x,t)$ – расход воды, m^3/c , $Q = V \cdot W$; $h(x,t)$ – уровень поверхности воды, м, $h = h(W,x)$; $\xi(x,t)$ – боковой приток, m^2/c ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; $\Theta_k = WC_k \sqrt{R_k}$ – модуль расхода канала, m^3/c ; $C_k = R_k^m / n_{mp}$ – коэффициент Шези для канала, $m^{1/2}/c$; $m \approx 1/6$ – показатель степени, определенный по экспериментальным данным; n_{mp} – коэффициент трения, для открытых каналов $n_{mp} \in [0.02; 0.03]$; R_k – гидравлический радиус канала, м.

Уравнение течения воды в дрене описывается уравнением Коновалова-Петрова в виде:

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

(3)

где: W_d – площадь сечения дрены, m^2 ; α – коэффициент неравномерности продольной скорости; R_d – гидравлический радиус дрены, м; $\Theta_d = wC_d \sqrt{R_d}$ – модуль расхода дрены, m^3/c ; C_d – коэффициент Шези для дрены, $m^{1/2}/c$; Q_d – суммарный сток воды на отрезке $[y; L]$; $Q_d = \int_y^L q(y)dy$; L – длина дрены, м; q – фильтрационный приток; $q = \frac{2\pi K_\phi}{\Phi} (H - h_d)$; H – уровень грунтовых вод, м; Φ – фильтрационные сопротивления на входе в дрину; $\Phi = \Phi_0 + \Phi_I$; $\Phi_I = \frac{1}{\pi} \ln \frac{4S}{d_d} \ln \frac{2S}{A\pi\delta}$ – фильтрационные сопротивления, обусловленные несовершенством конструкции дрены и формой входных отверстий; d_d – диаметр дрены, м; Φ_0 – фильтрационные сопротивления, определяемые граничными условиями фильтрации; S – длина гончарной трубки, м; δ – толщина водоприемного отверстия между дренажными трубками, м.

Фильтрация грунтовых вод в насыщенной зоне описывается квазилинейным двухмерным нестационарным уравнением капиллярной модели:

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

(4)

где: x – размерная координата, направленная вдоль канала, м; y – размерная координата, направленная перпендикулярно каналу, м; H – уровень грунтовых вод, м; μ_0 –

коэффициент водоотдачи; d_i – диаметр капилляров, м; μ_i – относительный объем капилляров диаметром d_i ; $K_f(z)$ – скорость фильтрации в зависимости от уровня z , м/с; L_d – расстояние между дренами, м; k – коэффициент «висячести»; T – водопроводимость водоносного горизонта, м²/сут; 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.

Для капилляров диаметром d для воды с $t = 20^{\circ}\text{C}$: $V_{ki} = 1.5 \cdot 10^5 \cdot d^2$, $H_{ki} = 3 \cdot 10^{-5} / d$.

Для этого уравнения граничные условия задаются на границах области интегрирования в виде нулевых потоков $\frac{\partial H}{\partial n} = 0$, где n – координата, перпендикулярная к границе.

Равномерность осушения массива системы достигается путем введения в параметры каналов проводящей сети объемов добегающего дренажного стока от составляющих водосборной системы дренажных систем к створу насосной станции, обеспечивающее непосредственную гидравлическую связь каждой отдельной дренажной системы со створом насосной станции.

Объемы добегающего рассчитываются с использованием интеграла Дюамеля, адаптированного для топологии польдерной системы:

$$W_{\text{вл.пл.}i} = q_{\text{др.с.}i} F_{\text{др.с.}i} \tau_i, \quad W_{\text{вл.кан.}k} = \sum_{i_k} W_{\text{вл.пл.}i_k}, \quad W_{\text{вл.польд}} = \sum_k W_{\text{вл.кан.}k} \quad (5)$$

где: $q_{\text{др.с.}i}$ – модуль стока, принятый для расчета дренажа, м/с, $F_{\text{др.с.}i}$ – 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.

Характерное время польдерной системы, $t_{nc} = \tau_{\text{max}} = L_{\text{max}} / V_{\text{max}}$, определяет время снижения напора на дренаже до горизонтов его заложения, задавая режим его работы и, как следствие, параметры дренажа: глубину заложения, диаметр и расстояние между дренами.

Расчет параметров и производительности насосной станции осуществляется с учетом объема каналов проводящей сети $W_{\text{кан}}$, принятого расчетного значения модуля дренажного стока $q_{\text{др.расч.}}$ и геологического сложения профиля канала.

Производительность насосной станции определяется как сумма:

$$Q_{nc} = Q_{\text{кан}} + Q_{\text{др}} = V_{\text{кан}} / t_{nc} + q_{\text{др}} F_{nc}, \quad (6)$$

где: $V_{\text{кан}}$ – объем канала от поверхности почвы до минимального горизонта откачки, м³; t_{nc} – характерное время польдерной системы, с; $q_{\text{др}}$ – расчетный модуль дренажного стока; F_{nc} – площадь осушаемого массива, га.

Численные эксперименты расчета параметров польдерной системы осуществлялись для топологии польдерной системы, приведенной на рис.1. Характеристика дренажа принималась в соответствии с ранее использованными данными [6].



Рис. 1. Топология польдерной системы, использованной в численных экспериментах при расчете эффективности ее работы для плотности проводящих каналов $L_{\text{кан}} = 12,3$ м/га

Рассчитанные значения эффективности работы дренажа, полученные для топологии систем, приведенных на рис. 2 в численных экспериментах исследования работы дренажа систем с размерами площадей осушения $F_{нс.} = 1000, 2000, 3000, 4000 \text{ га}$ плотностью сети каналов проводящей сети $L_{кан.} = 12.3 - 30.93 \text{ м/га}$, для значений коэффициентов фильтрации почв осушаемого массива $K_{ф.} = 1.25 \text{ м/сут}$. Параметры каналов польдерных систем рассчитывались с учетом объемов добегания стока, определяемых с учетом зависимости (5).

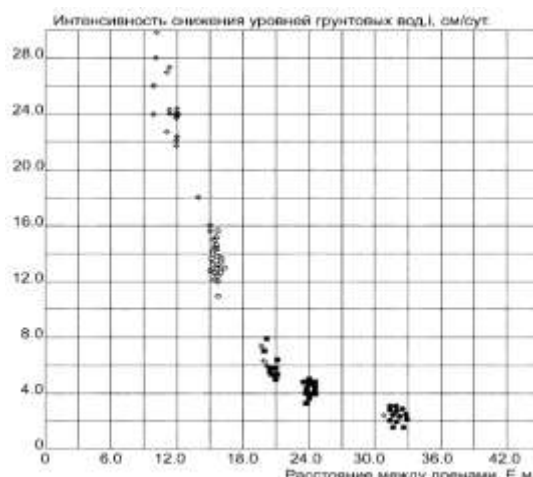


Рис. 2. Рассчитанные значения эффективности работы дренажа, полученные для топологии систем, приведенных на рис. 1

Полученные данные численных экспериментов показывают, что при выполнении условия учета в параметрах каналов польдерных систем объемов добегания стока, рассчитываемых соотношением (5), интенсивность снижения уровней грунтовых вод на осушаемом массиве определяется только величиной коэффициента фильтрации почвы. Этот результат подтверждает возможность получения задаваемой требованиями к регулированию водного режима выращиваемых сельскохозяйственных культур эффективности работы польдерной системы.

Заключение

1. Выбор типа многопольного севооборота, определяющего величину расчетного значения модуля дренажного стока $q_{др.расч.р}$ польдерной системы и ее конструктивное исполнение (осушительная, осушительно-увлажнительная, с применением орошения дождеванием), осуществляется на основе оценки экономической целесообразности его использования.

2. Равномерность осушения массива достигается обеспечением непосредственной гидравлической связи отдельных составляющих массив осушения дренажных систем со створом насосной станции путем учета в параметрах каналов объемов добегания стока, рассчитываемых с использованием адаптированного к топологии польдерной системы интеграла Дюамеля.

3. Построение топологии польдерной системы – это размещение на массиве осушения в плане и профиле составляющих систему элементов для расчета их параметров с учетом выбранного типа многопольного севооборота и принятой технологии сельскохозяйственного производства.

4. Проведение расчета параметров, составляющих водосбор польдерной системы дренажа элементов только в нестационарном, динамическом режиме их работы с использованием методов и зависимостей, наиболее полно и точно характеризующих процессы фильтрации влаги в почве.

5. Проведение реконструкции действующих польдерных систем, определение типа многопольного севооборота, размеров площади отдельных полей севооборотов основывается

на данных фактических значений модулей дренажного стока систем $q_{др.факт.}$, определяемых экспериментальным путем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов, В. А. Особенности стока на зимних польдерах Неманской низменности Калининградской области / В. А. Филатов // Конструкция и использование польдерных систем: сб. тр. ЛитНИИГиМ. – Елгава: Госиздат, 1981. – С. 50–62.

2. Галковский, В. Ф. Гидрологический режим польдеров Белорусского Полесья / В. Ф. Галковский // Конструкция и использование польдерных систем: сб. тр. ЛитНИИГиМ. – Елгава: Госиздат, 1981. – С. 41–79.

3. Филатов, В. А. Особенности работы незатапливаемых польдерных систем Калининградской области / В. А. Филатов, В. П. Ковалев, В. И. Лобан // Эксплуатация мелиоративных систем и использование мелиоративных земель: сб. тр. ЛитНИИГиМ. – Елгава: Госиздат, 1987. – С. 61–71.

4. Ковалев, В. П. Расчет параметров линейных польдерных систем / В. П. Ковалев // Мелиорация переувлажненных земель. – 2005. – №2(54). – С.64–83.

5. Кащенко, Н. М. Расчет линейных польдерных систем / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования: материалы юбилейной междунар. конф. – М., 2007. – С. 195–200.

6. Кащенко, Н. М. Моделирование работы линейных польдерных систем. Приведение польдерной системы к линейному виду / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев, В. В. Васильев // Вестник БГСХА. – 2013. – № 4. – С.108–112.

7. Кащенко, Н. М. Анализ применимости уравнения потенциала для моделирования работы дренажных систем / Н. М. Кащенко // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: XI Междунар. науч.-техн. конф. (МК-42-9). – Пенза, 2009. – С. 138–142.

8. Кащенко, Н. М. Моделирование работы линейных польдерных систем. Расчет переноса влаги в междренной полосе / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев, В. В. Васильев // Вестник БГСХА. –2014. – № 1. – С. 131–135.