

УДК 631.616:621.72

## ПОЛЬДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ СИСТЕМ

**Н. М. КАЩЕНКО**

*Балтийский Федеральный университет им. И. Канта,  
г. Калининград, Россия, 236016*

**В. В. ВАСИЛЬЕВ**

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

**В. П. КОВАЛЕВ**

*ООО «Бюро мелиоративных технологий»,  
г. Калининград, Россия, 236015*

*(Поступила в редакцию 10.09.2019)*

*Применение пolderных систем связано с сельскохозяйственным освоением безуклонных и малоуклонных территорий. Эффективность работы пolderных систем определяется работой насосной станции, позволяющей по положению уровней грунтовых вод и влажности почвы массива осушения, управлять откачкой дренажного стока. Экспериментальные данные показали, что неравномерность осушения является результатом несогласованной работы составляющих систему элементов.*

*Анализ многолетних системных исследований работы пolderных систем и результатов численных экспериментов, показал, что проведение реконструкции действующих пolderных систем, основанное на определении фактических значений модуля дренажного стока и показанной в численных экспериментах возможности достижения требуемых расчетных параметров работы дренажа, системы имеет существенный потенциал увеличения эффективности их работы. Используемая в расчетах проблемно-ориентированная математическая модель позволяет одновременно, с учетом всех составляющих пolderную систему элементов, рассчитывать их параметры в динамическом режиме, с учетом физических процессов формирования стока на осушаемом массиве. Учитывая достаточную для начала практического применения глубину проработки математической модели и составляющих ее моделей отдельных процессов, можно утверждать, что ее применение позволит разрабатывать проекты реконструкции пolderных систем, более полно отвечающие требованиям сельскохозяйственного производства на массивах осушения. Результаты экспериментальных исследований работы дренажа и численных экспериментов показывают, что проведение реконструкции действующих пolderных систем, основанной на данных фактических значений модулей дренажного стока систем позволит увеличить эффективность работы действующих пolderных систем после реконструкции от полутора до двух раз.*

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

*The use of polder systems is associated with the agricultural development of non-slope and low-slope territories. The efficiency of polder systems is determined by the operation of pumping station, which allows controlling the drainage according to the level of groundwater and soil moisture in the drainage array. Experimental data showed that the unevenness of drainage is the result of inconsistent operation of the components of the system.*

*An analysis of long-term systematic studies of the operation of polder systems and the results of numerical experiments showed that reconstruction of existing polder systems based on the determination of actual values of the drainage flow modulus and the possibility of achieving the required design parameters of the drainage system shown in numerical experiments has a significant potential to increase their efficiency. The problem-oriented mathematical model used in calculations allows, simultaneously, taking into account all the constituent elements of the polder system, to calculate their parameters in a dynamic mode, taking into account the physical processes of runoff formation on the drained array. Given the sufficient depth to develop the mathematical model and the individual models of its individual processes, it can be argued that its application will allow the development of reconstruction projects for polder systems that more fully meet the requirements of agricultural production on drainage arrays. The results of experimental studies of the drainage and numerical experiments show that the reconstruction of existing polder systems based on the actual values of drainage modules of the systems will increase the efficiency of existing polder systems after reconstruction from one and a half to two times.*

**Key words:** *polder system, uniformity of drainage, mathematical model.*

### **Введение**

Применение пolderных систем связано с сельскохозяйственным освоением безуклонных и малоуклонных территорий. Эффективность работы пolderных систем

определяется работой насосной станции, позволяющей по положению уровней грунтовых вод и влажности почвы массива осушения, управлять откачкой дренажного стока. В Калининградской области на Неманской низменности из  $F=74$  тысячи га полейдерных земель, в основном осушительного типа, на  $F=32\ 820$  га уложен закрытый материальный дренаж.

Общей тенденцией развития проектирования и строительства полейдерных систем является уменьшение площади массивов осушения и увеличение удельной производительности насосных станций [1, 3–6]. Проектирование дренажа полейдерных систем Неманской низменности осуществлено для выращивания монокультуры, трав для производства травяной муки. Использование многопольного севооборота приводит к необходимости при реконструкции действующих полейдерных систем создания систем двустороннего действия с применением орошения дождеванием.

### Основная часть

Системные экспериментальные исследования работы полейдерных систем Неманской низменности и изучение работы дренажа проводились на производственно-экспериментальных участках «Шиповский» и «Аксеново» (полейдерная система нс116а).

Экспериментальные данные показали, что неравномерность осушения является результатом несогласованной работы составляющих систему элементов. При проектировании действующих систем расчет параметров насосной станции и каналов проводящей сети проводился по гидрологическим зависимостям, непосредственно не учитывающим проектные характеристики дренажа, определяемым соответствующим значением модуля дренажного стока  $q_{др.расчет}$ . [1, 3–6].

Характерная для работы действующих систем неравномерность осушения массива, приводит к снижению эффективности работы дренажа, ориентировочно до 35÷40 %, и снижению на такую же величину эффективности использования вложенных в строительство средств, или, в стоимостном выражении, на ~19 200 млн руб. фактических затрат на строительство в основном закрытого материального дренажа.

Используемая в расчетах проблемно-ориентированная математическая модель позволяет одновременно, с учетом всех составляющих полейдерную систему элементов, рассчитывать их параметры в динамическом режиме с учетом физических процессов формирования стока на осушаемом массиве. Учитывая достаточную для начала практического применения глубину проработки математической модели и составляющих ее моделей отдельных процессов, можно утверждать, что ее применение позволит разрабатывать проекты реконструкции полейдерных систем, более полно отвечающие требованиям сельскохозяйственного производства на массивах осушения.

Принятая в расчетах схематизация формирования стока на осушаемом массиве полейдерной системы основана на использовании интеграла Дюамеля. Создание непосредственной гидравлической связи каждой отдельной дренажной системы со створом насосной станции, достигаемое наличием в параметрах каналов объемов добегающего стока, рассчитываемых по адаптированному к топологии полейдерной системы интегралу Дюамеля, обеспечивает равномерность осушения массива [3–6]:

$$W_{вл.эл.пл.} = q_{qp.c.i} \cdot F_{qp.c.i} \cdot \tau_i, \quad W_{вл.кан.} = \sum_{i=1}^n q_{qp.c.i} \cdot F_{qp.c.i} \cdot \tau_i, \quad W_{вл.польд.} = \sum_{k=1}^m W_{вл.кан.}, \quad (1)$$

где:  $W_{вл.эл.пл.}$  – объём влияния для элементарной площадки, дренажной системы,  $m^3$ ;  $W_{вл.кан.}$  – объём влияния для отдельного, единичного канала,  $m^3$ ;  $W_{вл.польд.}$  – объём влияния для полейдерной системы в целом,  $m^3$ ;  $q_{qp.c.i}$  – расчётный модуль стока дренажной системы,  $m^3/c \cdot га$ ;  $\tau_i$  – время добегающего расхода дренажной системы до створа насосной станции, с;  $\tau_i = L/v$ ;  $L$  – расстояние от дренажной системы до створа насосной станции, м;  $V$  – принятая расчётная скорость движения потока воды в канале, м/с;  $i = 1$ ;  $n$  – число дренажных систем с площадью  $F_{qpi}$ , подсоединённых к каналу;  $k = 1$ ;  $m$  – число каналов полейдерной системы.

Характерное время полейдерной системы,  $t_{nc} = \tau_{max} = L_{max} / V_{max}$ , определяет время снижения напоров на дренаже до горизонтов его заложения, задавая режим его работы и

определяет параметры дренажа: глубину заложения, диаметр и расстояние между дренами.

Математическая модель польдерной системы [3–6]:

Течение воды в канале описывается системой уравнений Сен–Венана:

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

где:  $Q(x,t)$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с,  $Q = V \cdot W$ ;  $h(x,t)$  – уровень поверхности воды, м,  $h = h(W,x)$ ;  $\xi(x,t)$  – боковой приток, м<sup>3</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Theta_k = WC_k \sqrt{R_k}$  – модуль расхода канала, м<sup>3</sup>/с;  $C_k = R_k^m / n_{mp}$  – коэффициент Шези для канала, м<sup>1/2</sup>/с;  $m \approx 1/6$  – 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:

$$\frac{\partial h_d}{\partial y} = \frac{2\alpha}{gW_d^2} qQ_d + \frac{Q_d |Q_d|}{\Theta_d^2}, \quad (3)$$

где:  $W_d$  – площадь сечения дрены, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент неравномерности продольной скорости;  $R_d$  – гидравлический радиус дрены, м;  $\Theta_d = wC_d \sqrt{R_d}$  – модуль расхода дрены, м<sup>3</sup>/с;  $C_d$  – коэффициент Шези для дрены, м<sup>1/2</sup>/с;  $Q_d$  – 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;  $\Phi$  – фильтрационные сопротивления на входе в дрину;  $\Phi = \Phi_0 + \Phi_l$ ;  $\Phi_l = \frac{1}{\pi} \ln \frac{4S}{d_d} \ln \frac{2S}{A\pi\delta}$  – фильтрационные сопротивления, обусловленные несовершенством конструкции дрены и формой входных отверстий;  $d_d$  – диаметр дрены, м;  $\Phi_0$  – фильтрационные сопротивления, определяемые граничными условиями фильтрации;  $S$  – длина гончарной трубки, м;  $\delta$  – толщина водоприемного отверстия между дренажными трубками, м.

Фильтрация грунтовых вод в насыщенной зоне описывается квазилинейным двумерным нестационарным уравнением капиллярной модели и моделью переноса влаги по пленкам:

$$\begin{cases} (\mu_0 - \sum_{i=1}^n \mu_i) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \left( \int_{H_d}^H K_\phi(z) dz \cdot \nabla H \right) + \xi - \sum_{i=1}^n \mu_i f_i - \int_{H_d}^0 \frac{h_0 - h}{\tau_p} S dz \\ \frac{\partial H_i}{\partial t} = f_i, \quad i = \overline{1, n} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\vec{V}) = \frac{h_0 - h}{\tau_p} \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla, \vec{V}) + a\nabla h = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где:  $x$  – размерная координата, направленная вдоль канала, м;  $y$  – размерная координата, направленная перпендикулярно каналу, м;  $H$  – уровень грунтовых вод, м;  $\mu_0$  – коэффициент водоотдачи;  $d_i$  – диаметр капилляров, м;  $\mu_i$  – относительный объем капилляров диаметром  $d_i$ ;  $K_\phi(z)$  – скорость фильтрации в зависимости от уровня  $z$ , м/с;  $L_d$  – расстояние между дренами, м;  $k$  – коэффициент «висячести»;  $T$  – водопроницаемость водоносного горизонта, м<sup>2</sup>/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  $t = 20^0\text{C}$ :  $V_{ki} = 1.5 \cdot 10^5 \cdot d^2$ ,  $H_{ki} = 3 \cdot 10^{-5} / d$ ;  $S$  – удельная площадь порового пространства, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – суммарный приток и отток, м/с;  $h$  – толщина пленки, м;  $\bar{V}$  – осредненная скорость движения по пленке, м/с;  $a$  – эмпирический параметр, полученный по данным [7], м/с<sup>2</sup>. В этой модели обмен влагой между пленкой и капиллярной влагой в уравнениях непрерывности пленки и в капиллярных уравнениях учитывается слагаемым:  $\frac{h_0 - h}{\tau_p}$ , где  $h_0$  – толщина равновесной пленки, м,  $\tau_p$  – скорость

(характерное время) влагообмена, с.

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.

Численные эксперименты расчета параметров польдерной системы осуществлялись для топологии польдерной системы, приведенной на рис.1. Характеристики дренажа принимались в соответствии с ранее использованными данными [7, 8]. Производительность насосной станции определялась как сумма:

$$Q_{nc} = Q_{кан} + Q_{др} = V_{кан} / t_{nc} + q_{др} F_{nc}, \quad (5)$$

где:  $V_{кан}$  – объем канала от поверхности почвы до минимального горизонта откачки, м<sup>3</sup>;  $t_{nc}$  – характерное время польдерной системы, с;  $q_{др}$  – расчетный модуль дренажного стока;  $F_{nc}$  – площадь осушаемого массива, га.

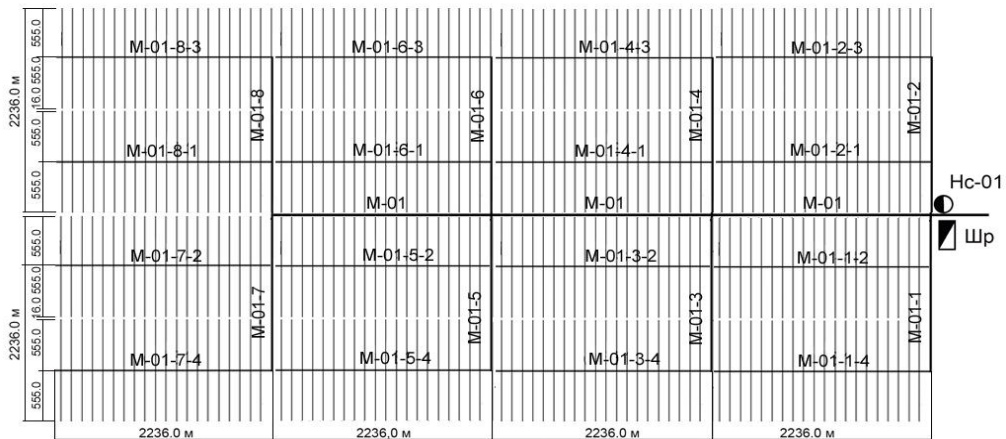


Рис. 1. Топология польдерной системы использованной в численных экспериментах при расчете эффективности ее работы для плотности проводящих каналов  $L_{кан..} = 12.3 м / г а$

Рассчитанные значения эффективности работы дренажа, полученные для топологии системы рис. 1 приведены на рис. 2.

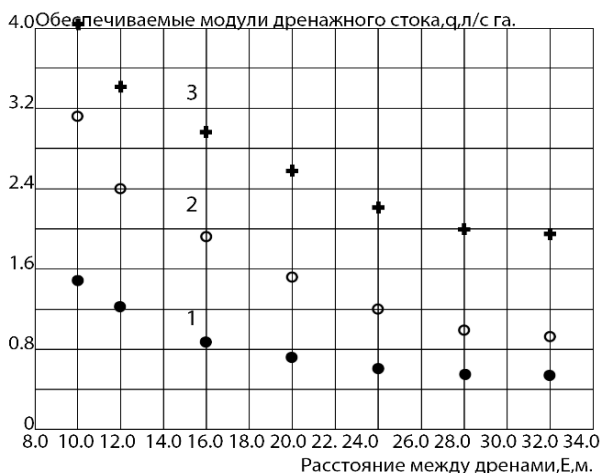


Рис.2. Рассчитанные значения эффективности работы дренажа  $q_{др.расч.}$ , полученные для топологии систем, приведенных на рис.1 для массивов площадью  $F=1\ 000-4\ 000$  га, плотностью каналов проводящей сети  $L_{кан}/F_{массива}=8.9\div 26.83$  м/га, длинах дрен  $L_{др}=185\div 559$  м, диаметре дрен  $d_{др}=100$  мм, положении водоупора на глубине  $h_{вод}=4.0$  м, показывающие, что расчетное значение модуля дренажного стока  $q_{др.расч.}$  зависит только от величины коэффициента фильтрации почв  $k_{ф}$  массива. Аппроксимация 1-●,  $k_{ф}=0.5$ м/сут –  $q = 1.7 + 2.32\exp(-E/10)$ , 2-○,  $k_{ф}=1.25$ м/сут –  $q = 0.8 + 2.35\exp(-E/8)$ , 3-+,  $k_{ф}=2.5$ м/сут –  $q = 0.4 + 1.1\exp(-E/8)$

Данные численных экспериментов, приведенных на рис. 2, показывают возможность получения эффективности работы дренажа, в пределах значений модулей дренажного стока  $q_{др.факт.} = 0.96-2.31$ л/(с·га), соответствующих требованиям всех выращиваемых сельскохозяйственных культур многопольного севооборота к регулированию водного режима.

Многолетние исследования работы дренажа, проведенные на экспериментальных системах двустороннего действия «Шиповский» и «Аксеново» (рис.3а) показали, что фактические значения модулей дренажного стока  $q_{др.факт.} = 1.6-2.51$ л/(с·га), выше их проектных значений  $q_{др.пр.} = 1.1-1.2$ л/(с·га). Эффективность работы дренажа польдерных систем Белорусского Полесья характеризуется величиной модуля дренажного стока в пределах  $q_{др.факт.} = 0.6-1.55$ л/(с·га) для нагрузок на системы в виде осадков весеннего периода в размере  $h_{ос.} = 250$ мм [2].

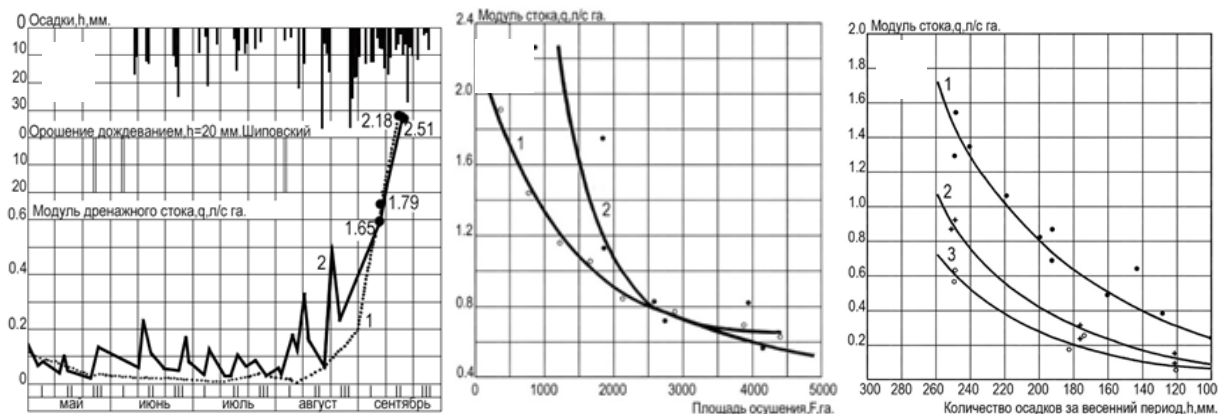


Рис 3. а) Динамика формирования модулей дренажного стока на производственно-экспериментальных участках «Шиповский» и «Аксеново». «Шиповский» – экспериментальный участок двустороннего действия площадью  $F_{нс.} = 43$ га, самотечная система. «Аксеново» – опытно-производственная польдерная система нс116а площадью  $F_{нс.} = 150.0$ га двустороннего действия, имеющая осушительно-увлажнительную насосную станцию. б) зависимость модуля откачки с польдерных систем от размеров площади осушаемого массива: 1- $q = 0.6+2.0\exp(-0.001F)$ , весеннее половодье, 2-  $q = 0.4+3.7\exp(-0.0008F)$ , летне-осенний паводок, ●,○–экспериментальные данные [1]; в) зависимость

модуля откачки с польдерных систем для однородной нагрузки на системы в виде осадков от величины осадков весеннего периода. Площадь польдерной системы: 1– 980 га,  $q=3.6 e^{-0.0127h}$ ; 2–2250 га  $q=7.0 e^{-0.0155h}$ ; 3 –4350 га,  $q=5.8 e^{-0.0154h}$ ; \*<sub>0</sub>–экспериментальные данные. Зависимость модуля откачки от площади массива осушения имеет вид  $q_{др.факт.} = 113F^{-0.63}$  [2]

Опыт многолетних экспериментальных исследований работы польдерных системах и результатов численных экспериментов позволил сформулировать основные принципы расчета и проектирования реконструкции действующих и проектирования новых польдерных систем [6]. Из анализа экспериментальных данных и данных численных экспериментов следует, что проведение реконструкции действующих польдерных систем, основанное на данных фактических значений модулей дренажного стока  $q_{др.факт.} = 1.6 - 2.51л/(с \cdot га)$ , определяемых экспериментальным путем методом «коротких каналов» и данных численных экспериментов, доказывающих возможность достижения на массивах осушения площадью  $F=500 \div 4\ 000$  га расчетных модулей дренажного стока  $q_{др.факт.} = 0.96 - 2.31л/(с \cdot га)$ . Эффективность работы действующих польдерных систем после реконструкции имеет потенциал увеличения, в зависимости от площади систем, от полутора до двух раз.

Приведенные данные полевых и численных экспериментов относятся к работе польдерных систем в режиме осушения. В климатических условиях Славского района Калининградской области и Белорусского Полесья получение стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур, особенно овощей, может быть достигнуто только при применении орошения дождеванием.

Представляет интерес объект «Жидче» Пинского района, расположенный на землях СПК «Невель» площадью  $F=2\ 700$  га, имеющий наливное водохранилище и возможность забора воды из р. Припять. Площадь орошения составляет  $F=645$  га [10]. Возможность создания польдерных систем, имеющих топологию, подобную «Жидче», в условиях уже сформировавшейся топологии территории польдерных систем Славского района достаточно затруднительно.

### **Заключение**

Результаты экспериментальных исследований работы дренажа и численных экспериментов показывают, что проведение реконструкции действующих польдерных систем, основанной на данных фактических значений модулей дренажного стока систем  $q_{др.факт.} = 1.6 - 2.51л/(с \cdot га)$ , определенных методом «коротких каналов», и результатах численных экспериментов, доказывающих возможность достижения на массивах осушения площадью  $F=500 \div 4\ 000$  га расчетных модулей дренажного стока  $q_{др.факт.} = 0.96 - 2.31л/(с \cdot га)$ , увеличение эффективности работы действующих польдерных систем после реконструкции составит от полутора до двух раз.

### **ЛИТЕРАТУРА.**

1. Филатов, В. А. Особенности стока на зимних польдерах Неманской низменности Калининградской области / В. А. Филатов // Конструкция и использование польдерных систем / Труды ЛитНИИГиМ. – Елгава.: Госиздат. – 1981. С. 50–62.
2. Галковский, В. Ф. Гидрологический режим польдеров Белорусского Полесья / В. Ф. Галковский // Конструкция и использование польдерных систем / Труды ЛитНИИГиМ. – Елгава, 1981. – С.41–79.
3. Ковалев, В. П. Расчет параметров линейных польдерных систем / В. П. Ковалев // Мелиорация переувлажненных земель. – 2005. – № 2(54). – С. 64–83.
4. Кащенко, Н.М. Расчет линейных польдерных систем / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. Материалы юбилейной международной конференции. – М., 2007. – С. 195–200.
5. Кащенко, Н. М. Моделирование работы линейных польдерных систем. Приведение польдерной системы к линейному виду / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев, В. В. Васильев. // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – №.4. – 2013. – С. 108–112.
6. Кащенко, Н. М. Расчет параметров польдерных систем сельскохозяйственного назначения. / Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев, В. В. Васильев. // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – №.4. – 2018. – С. 128–132.

7. Дилько-влажностные характеристики почвенных образцов с различным содержанием гумуса в сантиметровом и дециметровом диапазонах / П. П. Бобров // Естественные науки и экология. Ежегодник ОмГПУ. – 2001. – С. 3–7.
8. Закржевский, П. И. Экспериментальное исследование водоприемной способности затопленных дрен / П. И. Закржевский, Н. К. Вахонин // Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем. – Минск, 1978. – С. 58–66.
9. Месюк В. М. Осушительное действие гончарных дрен новых конструкций / В. М. Месюк, В. Т. Климов // Мелиорация и водное хозяйство. – Вып.5. – 1983. – С. 4–9.
10. Технично-экономические показатели наливных водохранилищ польдерных систем в зоне Полесья / С. В. Галковский и [др.] // Экономика и банки. – 2012. – №1. – С. 59–66.