

Н.М. КАЩЕНКО

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

В.Г. ПУНТУСОВ

ФГБУ «Управление Калининградмелиоводхоз»
г. Калининград, Россия, 236010

В.П. КОВАЛЕВ

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

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация

Анализ полевых данных работы действующих пolderных систем и результатов численных экспериментов показывает, что проведение реконструкции действующих пolderных систем, основанное на экспериментально определенных значениях модуля дренажного стока, имеет существенный потенциал увеличения эффективности их работы.

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

Abstract

Analysis of field data on the operation of existing polder systems and the results of numerical experiments shows that reconstruction of existing polder systems based on experimentally determined values of the drainage flow modulus has a significant potential to increase the efficiency of their operation.

Key words: polder system, the uniformity of drying, mathematical model.

Действующие пolderные системы Неманской низменности Славского района Калининградской области нашли применение при сельскохозяйственном освоении безуклонных и малоуклонных затопливаемых территорий. Общая площадь пolderных систем низменности составляет $F = 65\ 800$ га, из которых $F = 32\ 820$ га осушено закрытым материальным дренажем. Эффективность работы пolderных систем определяется работой насосной станции, управляющей откачкой избытка дренажного стока с осушаемого массива [1]. Закрытый материальный дренаж запроектирован на значения модуля дренажного стока $q_{др.факт.} = 1.10 - 1.20 л / (с \cdot га)$. Соответственно и топология действующих систем запроектирована на обеспечение производства на массивах осушения монокультуры – трав. Переход на ведение на осушаемом массива с/х производстве с использованием многопольного севооборота требует внесения в топологию сети проводящих каналов и конструкцию системы существенных изменений, зависящих от размеров площади осушаемого массива.

В климатических условиях Неманской низменности Калининградской области получение стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур может быть достигнуто только с использованием орошения дождеванием, реализовать которое в условиях равнинного рельефа возможно только с устройством наливных водохранилищ [2, 3]. Необходимо отметить, что создание наливных водохранилищ на Неманской низменности затруднительно ограниченностью водных ресурсов территории.

Сложившаяся тенденция развития проектирования и строительства польдерных систем, уменьшения площади массивов осушения и увеличения производительности насосных станций, основана на практическом опыте эксплуатации и исследованиях действующих систем, запроектированных с использованием существующих методов [4, 5, 7].

Расчет параметров насосной станции и каналов проводящей сети действующих систем проведен по гидрологическим зависимостям, непосредственно не учитывающим проектных характеристик дренажа, определяемых принятым при проектировании дренажа значением модуля стока $q_{др.пр.} = 1.10 - 1.20 л/(с \cdot га)$ [4–7, 8]:

Формула Г.А. Алексеева для расчета расходов воды весеннего половодья (нашла применение при расчете параметров каналов и производительности насосной станции 60) [8]: "Временная инструкция по водохозяйственным и гидравлическим расчетам осушительных систем с механическим водоподъемом в Калининградской области". "Росводстрой". Трест "Росводстрой" – М.: Машинописный вариант. 1949 г. 105 с., примененная при расчете параметров польдерных систем 15 и 36, 38, 46 в 1971 и 1973 г. г. предполагает значения максимальных расходов стока, величины которых приведены в табл. 1

Ведомость максимальных расходов стока л/(с га) для площади водосбора $F = 1000$ га (табл. 1).

Таблица 1.

N п/п	Культура	Период	Почвы осушаемого массива.		
			Глина	Суглинок	Супесь, торф
1	2	3	4	5	6
	Полевые культуры	Весна	1.75	1.50	1.25
		Лето	1.45	1.20	0.90
2	Луга и пастбища	Весна	1.15	0.95	0.75
		Лето	1.05	0.90	0.70
3	Овощи	Весна	2.10	1.80	1.50
		Лето	1.75	1.45	1.10

Примечание: Указанные в таблице нормы относятся к обычным осушаемым участкам польдеров, обслуживаемым одной насосной станцией с площадью порядка 1 000 га (10 км²).

Для участков в 2 000 и 4 000 га нормы следует уменьшить соответственно на 10% и 20%, а для участков в 500 га увеличивать на 10%.

Экспериментальные гидрологические исследования работы действующих польдерных систем, проведенные В.А. Филатовым для Неманской низменности и В.Ф. Галковским для Белорусского Полесья показывают, что эффективность работы дренажа определяется зависимостями стока с польдерных систем от их площади, т.е. дренаж, запроектированный на модуль дренажного стока $q_{др.пр.} = 1.1 - 1.2 л / (с \cdot га)$ будет эффективен для площадей до, ориентировочно, $F_{nc} < 1100 \div 1600$ га (рис.1) [3, 6]. Фактически это означает, что дренаж, имеющий установленную в полевых экспериментах эффективность работы в пределах $q_{др.пр.} = 1.1 л / (с \cdot га) - q_{др.пр.} = 2.31 л / (с \cdot га)$ для площади массива осушения $F_{nc} = 3500$ га действующих польдерных систем не будет превышать значение модуля $q_{др.факт} = 0.7 л / (с \cdot га)$ (рис.1) [4-6].

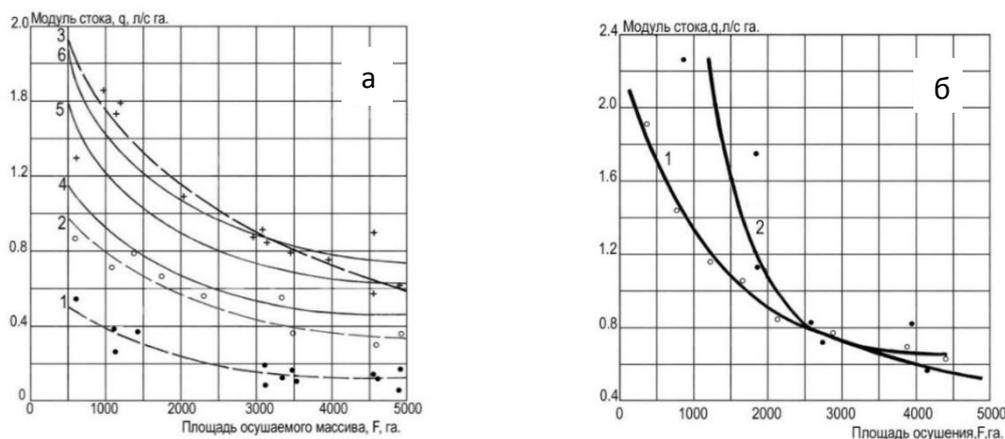


Рис. 1. а) Аппроксимирующие зависимости фактических значений модулей стока с польдерных систем. (б). Неманская низменность (---) $q = A \cdot F^{-0.43}$, 4 – $A = 26.0$ при обеспеченности $P = 1\%$, 5 – $21.6 - P = 5\%$, 6 – $16.0 - P = 25\%$, •, ○ – экспериментальные данные [6], Белорусское Полесье (—) 1-маловодный год – $q = 145 F^{-0.89}$, 2 – средневодный год – $q = 11.5 F^{-0.41}$, 3 – многоводный год – $q = 3.1 e^{-0.00064 F}$ [4-6].

б) Зависимость модуля откачки с польдерных систем от размеров площади осушаемого массива. 1 – $q = 0.6 + 2.0 \exp(-0.001 F)$, весеннее половодье, 2 – $q = 0.4 + 3.7 \exp(-0.0008 F)$, летне-осенний паводок, •, ○ – экспериментальные данные [4, 5]

Учитывая, что дренаж польдерных систем запроектирован на модули стока $q_{др.пр.} = 1.1 - 1.2 л / (с \cdot га)$ становится очевидной необходимость исследования работы действующих систем Неманской низменности и устроенного на массивах осушения дренажа. В частности, это относится к польдерным системам с построенным материальным дренажем:

15: $F_{oc} = 2420$ га,

29: $F_{oc} = 2980$ га,

35: $F_{oc} = 3461$ га,

38: $F_{oc} = 3461$ га,

50: $F_{oc} = 3340$ га,

51: $F_{oc} = 4940$ га.

Из приведенных экспериментальных данных рисунка 1 следуют зависимости [7]:

$$q_{np.c} F = q_{qp.c} / (1 - \varphi_{в.н}) F, \quad q_{н.с} F = q_{qp.c} / \varphi_{в.н} F \quad (1)$$

$$\varphi_{в.н} = 13.8 / (F + 450)^{0.43} \quad (2)$$

где: $q_{np.c}$ – модуль стока для расчета параметров проводящей сети, л/(с га); $q_{н.с}$ – модуль стока для расчета производительности насосной станции, л/(с га); $q_{qp.c}$ – модуль дренажного стока л/(с га); $\varphi_{в.н}$ – модуль редукиции стока весеннего половодья; F – площадь осушаемого массива, га.

Зависимости (1, 2) вносят некоторую определенность в расчет польдерных систем и могут быть применены для предварительных расчетов.

Проведенные системные экспериментальные исследования работы действующих систем 15, 20, 29, 35, 37, 41 выявили характерную для них неравномерность осушения массива, приводящую к снижению эффективности работы дренажа до 35÷40%. При откачке в открытых каналах проводящей сети, действующих польдерных систем, формируются уклоны свободной поверхности воды в пределах $i = 1.5 \dots 2.5 \cdot 10^{-4}$, влияние которых на уровенный режим в каналах распространяется на расстояние в $L = 3.5 \dots 5.0$ км и формирует динамику уровней грунтовых вод, имеющую для польдерной системы 15 следующий вид $i_{yгв} = 6.7 \exp(-0.00026L)$, где $i_{yгв}$ – уклон грунтовых вод, L – расстояние от рассматриваемой дренажной системы, по каналу, до створа насосной станции, м.

Многолетнее изучение работы дренажа, проведенное на производственно-экспериментальных участках "Шиповский" (самотечная система с орошением дождеванием, $F = 46$ га) и "Аксеново" (польдерная система нс116а с орошением дождеванием, $F = 116$ га) показало, что рассчитанные по использованным методам параметры дренажа действующих польдерных систем, имеют эффективность работы, существенно превышающую их проектные параметры [10, 11, 17, 18].

Расстояние между дренами польдерных систем рассчитывалось преимущественно по формулам С.Ф. Аверьянова [9]:

$$E = \sqrt{\frac{8KH_2(H_1 - h_0)^2}{\delta(H_1^2 - H_2^2)}} T, \quad T = \frac{1}{8} \frac{\delta E^2 (H_1^2 - H_2^2)}{KH_2(H_1 - h_0)^2}$$

где: K – коэффициент фильтрации; H_1 – начальное положение грунтовых вод; H_2 – искомое положение кривой депрессии; T – время понижения уровня грунтовых вод от H_1 до H_2 .

При проведении реконструкции польдерной системы 15 расстояние между дренами в режиме осушения рассчитывалось по формуле стационарной фильтрации С.Ф. Аверьянова (1970 г.)

$$E = 2H \sqrt{\frac{k}{q} \left(1 + \frac{2T}{H}\right) k}, \quad k = \frac{1}{1 + \frac{2T}{E} 2.94 \lg \frac{T}{\pi d}}$$

Превышение фактической эффективности работы построенного дренажа действующих польдерных систем над их проектными параметрами приводит к необходимости его экспериментальной проверке при проведении реконструкции систем [10, 11, 17, 18].

Анализ результатов исследований работы действующих польдерных систем показал, что для достижения планируемых эксплуатационных характеристик расчет параметров польдерной системы, должен быть проведен одновременно и с учетом всех составляющих систему элементов, в динамическом режиме, с использованием предложенной проблемно-ориентированной математической модели [4–7, 17, 18].

Расчет фильтрация грунтовых вод в междренной полосе достаточно хорошо описывается квазилинейным двухмерным нестационарным уравнением капиллярной модели, реализуемой совместно с моделью переноса влаги по пленкам

При расчете переноса влаги по пленкам использована физическая модель порового пространства почвы, предполагающая неразрывность в почвенном массиве пор одного диаметра которая, с учетом экспериментальных данных распределения пор по диаметрам, приводит к гипотезе о наличии в почве минимального объема, характеризуемого спектром распределения пор и независимостью его свойств от расположения и ориентации в почве [12–14, 15, 16]. Так же использованы экспериментальные данные [15]

Принятая схематизация формирования стока на осушаемом массиве, основана на интеграле Дюамеля. Непосредственная гидравлическая связь каждой отдельных дренажных систем массива осушения со створом насосной станции обеспечиваемая созданием в параметрах каналов объемов добегающего стока, рассчитываемых по адаптированному к топологии польдерной системы интегралу Дюамеля, приводит к равномерному осушению массива [10,11,17,18]:

$$\begin{aligned} W_{\text{вл.эл.пл.}} &= q_{\text{др.с.}i} \cdot F_{\text{др.с.}i} \cdot \tau_i, \\ W_{\text{вл.кан.}} &= \sum_{i=1}^n q_{\text{др.с.}i} \cdot F_{\text{др.с.}i} \cdot \tau_i, \\ W_{\text{вл.польд.}} &= \sum_{k=1}^m W_{\text{вл.кан.}} \end{aligned} \quad (6)$$

где: $W_{\text{вл.эл.пл.}}$ – объём влияния для элементарной площадки, дренажной системы, м^3 ; $W_{\text{вл. кан}}$ – объём влияния для отдельного, единичного канала, м^3 ; $W_{\text{вл. польд.}}$ – объём влияния для польдерной системы в целом, м^3 ; $q_{\text{др.с.}i}$ – расчётный модуль стока дренажной системы, $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{га}$; τ_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; $i = 1, \dots, n$ – число дренажных систем с площадью $F_{\text{др.с.}i}$, подсоединённых к каналу; $k = 1, \dots, m$ – число каналов польдерной системы. Характерное время польдерной системы, $t_{\text{nc}} = \tau_{\text{max}} = L_{\text{max}} / V_{\text{max}}$ определяет время снижения

напоров на дренаже до горизонтов его заложения, и устанавливает зависимость расстояния между дренами от площади осушаемого массива системы. Наличие такой взаимосвязи подтвердилось при проведении численных экспериментов. Для $q_{др} = 1.0$ л/(с·га) и коэффициента фильтрации грунта массива $k_{ф} = 1.5$ м/сутки зависимость расстояний между дренами (E) и площадью массива осушения (F) имеет существенно выраженную связь $E = 8 + 32 \exp(-F/1250)$ [10, 11].

Производительность насосной станции определяется как сумма:

$$Q_{нс.} = Q_{кан} + Q_{др} = V_{кан} / t_{нс} + q_{др} F_{нс}$$

где: $V_{кан}$ – объем канала от поверхности почвы до минимального горизонта откачки, м³; $t_{нс}$ – характерное время польдерной системы, с; $q_{др}$ – расчетный модуль дренажного стока; $F_{нс}$ – площадь осушаемого массива, га. Для условия $V_{кан} / t_{нс} = q_{др} F_{нс}$ осушаемый массив перестает быть активно управляемым.

Математическая модель польдерной системы, ориентированная на расчет параметров систем при работе в режиме осушения, кроме системы уравнений (5), включает уравнения, описывающие течения воды в каналах проводящей сети, уравнение течения воды в дрене [10, 11, 17, 18].

Использование математической модели при расчете параметров польдерных систем следует рассматривать как реализуемый ресурс повышения качества проектирования реконструкции польдерных систем. Численные эксперименты, проведенные с использованием математической модели для топологии польдерной системы площадью $F_{нс} = 4\ 000$ га показали, что при соблюдении условия (6) становится возможным получение значения эффективности работы дренажа в виде модуля дренажного стока в пределах $q_{др.факт.} = 0.96 - 2.31л/(с \cdot га)$, соответствующего требованиям к водному режиму почв для всех выращиваемых сельскохозяйственных культур многопольного севооборота на всей площади осушаемого массива в пределах $F_{нс} = 100-4\ 000$ га [21].

Топология польдерной системы, использованной в численных экспериментах, имеет следующие параметры. Почвы $K_{ф} = 1.25$ м/сут. Площадь отдельных полей $F = 500$ га. Общая площадь массива осушения $F=4\ 000$ га. Рассчитанные уклоны свободной поверхности воды в каналах проводящей сети при выполнении условия (6), обеспечивающего непосредственную гидравлическую связь дренажных систем с насосной станцией, имеют значения $i = 0.000002 - 0.000014$ [18].

Естественно сложившаяся необходимость перехода к ведению на осушаемых массивах с/х производства с использованием многопольного севооборота требует корректировки параметров каналов проводящей сети и насосной станции и внесения в топологию сети проводящих каналов и конструкцию системы существенных изменений, зависящих от размеров площади осушаемого массива, определяемых величинами фактических

значений модулей дренажного стока $q_{др.факт.}$ определяемых экспериментальным путем, методом "коротких каналов".

Выводы

Результаты многолетних экспериментальных исследований работы польдерных системах и проведенных численных экспериментов позволили сформулировать основные принципы расчета и проектирования реконструкции действующих польдерных систем:

– тип многопольного севооборота сельскохозяйственного производства на массиве осушения реконструируемой системы определяется экспериментальным значением модулей дренажного стока систем $q_{др.факт.} = 1.6 - 2.51л/(с \cdot га)$, полученных методом "коротких каналов";

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

– реконструкция польдерной системы заключается в перестроении топологии системы и пересчете параметров сети проводящих каналов и насосной станции в динамическом режиме с учетом всех составляющих польдерную систему элементов с использованием предложенной проблемно-ориентированной математической модели и направлена на обеспечение работы фактических значений модулей дренажного стока систем, полученных экспериментальным путем, методом "коротких каналов":

а. реконструкция польдерной системы в варианте с использованием одной насосной станции для массива осушения польдерных систем $F < 1400$ для одно и многопольного ведения сельскохозяйственного производства;

б. реконструкция польдерной системы в варианте использования с использованием двух и более насосных станций с соответствующим разделением массива осушения и реформатированием топологии сети проводящих каналов и самого осушаемого массива для польдерных систем площадью $F > 1400$ га для одно и многопольного ведения сельскохозяйственного производства;

в. строительство и включение в топологию отдельных систем или группы польдерных систем наливных водохранилищ для создания технической возможности проведения орошения дождеванием на осушаемом массиве;

– проведение реконструкции действующих польдерных систем, основанное на фактических значениях модулей дренажного стока $q_{др.факт.}$, определяемых экспериментальным путем методом "коротких каналов" и

использованием предложенной проблемно-ориентированной математической модели и учетом результатов, полученных с ее использованием, имеет существенный, от полутора до двух раз, потенциал увеличения эффективности их работы для массивов осушения площадью $F = 100 - 4\ 000$ га.

Литература

1. В.А. Филатов. Режим работы насосных станций при осушении польдерных земель. // Клг.: Госиздат. 1965. 45с.
2. П.П. Сташкевич. Влияние климатических факторов на режим орошения в условиях Калининградской области. // Природные условия мелиорации земель Калининградской области. Клг. 1977. С.52-58.
3. С.В. Галковский, В.Ф. Галковский, Д.В. Куземкин, В.В. Пекун. Техно-экономические показатели наливных водохранилищ польдерных систем в зоне Полесья. // Экономика и банки. Мн. 6 2012. № 1. С.59-66.
4. В.А. Филатов. Опыт осушения польдерных земель калининградской области. // Мелиорация земель в зоне влияния равнинных водохранилищ // Труды ВАСХНИЛ. М.: Колос. 1974. С.169-183.
5. В.А. Филатов. Особенности стока на зимних польдерах Неманской низменности Калининградской области. // Конструкция и использование польдерных систем. // Труды ЛитНИИГиМ. Елгава: Госиздат. 1981. С.50-62.
6. В.Ф. Галковский. Гидрологический режим польдеров Белорусского Полесья. // Конструкция и использование польдерных систем // Труды ЛитНИИГиМ. Елгава: 1981. С.41-79.
7. В.А. Филатов, В.П. Ковалев. Расчет польдерных систем с учетом редукции стока. //Мелиорация и водное хозяйство. М. 2005. №4. С.31-34.
8. Г.А. Алексеев. Схема расчета максимальных дождевых паводков по формуле предельной интенсивности осадков с помощью кривых редукции осадков и стока. // Труды ГГИ. 1966. вып.134 С.44-50.
9. С. Ф. Аверьянов. Горизонтальный дренаж при борьбе с засолением орошаемых земель. // М.: Академия наук. 1959. 83 С.
10. Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев. Расчет линейных польдерных систем. // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. Материалы юбилейной международной конференции. М.: 2007. С.195-200.
11. Н.М. Кащенко, В.П. Ковалев, В.В. Васильев. Моделирование работы линейных польдерных систем. Приведение польдерной системы к линейному виду. // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. Т4. 2013 г. .108-112.
12. П.П. Бобров, Т.А. Беляева, О.В. Галеев, В.И. Убогов. Диэлько-влажностные характеристики почвенных образцов с различным содержанием гумуса в сантиметровом и дециметровом диапазонах. // Естественные науки и экология. Ежегодник ОмГПУ. 2001. С.3-7
13. С. Нерпин, Е. Хлопотенков. Обобщение закона Дарси для случаев нелинейной фильтрации в ненасыщенных и насыщенных грунтах. // Доклады ВАСХНИЛ.М. 1970. №11. С.3-17.
14. К.П. Лундин, Л.Б. Свердлова. Исследование структурных пор торфа с помощью радиоактивных изотопов. // Мелиорация и использование осушенных земель. – Мн.: Урожай. 1966. С.48-67.
15. Ф.Е. Колясев. результаты исследования по движению воды в почве при различных влажностях. // Сб. трудов по агрономической физике. Вып.4. М., Лн.: ЛГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ. 1948. С.141-164.

16. Н.М. Кащенко, В.П. Ковалев. Расчет влагопереноса в почве при расчете параметров дренажа польдерных систем. // Инновационные технологии в мелиорации. Материалы юбилейной международной конференции. – М., 2011. С.79-84.
17. Н. М. Кащенко, В. П. Ковалев, В. В. Васильев. Моделирование работы линейных польдерных систем. Расчет переноса влаги в междренной полосе. // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. Т.1. 2014 г. С.131-135.
18. Н. М. Кащенко, В.П. Ковалев, В.В. Васильев. Польдерные системы сельскохозяйственного назначения. Расчет параметров реконструируемых систем. // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. №.4. 2019 г. С.131-137.

REFERENCES

1. Filatov V.A. Rezhim raboty` nasosny`x stancij pri osushenii pol`dorny`x zemel`. Kaliningrad: Gosizdat, 1965. 45 s.
2. Stashkevich P.P. Vliyanie klimaticheskix faktorov na rezhim orosheniya v usloviyax Kaliningradskoj oblasti // Prirodny`e usloviya melioracii zemel` Kaliningradskoj oblasti. Kaliningrad, 1977. S. 52–58.
3. Texniko-ekonomicheskie pokazateli nalivny`x vodoxranilishh pol`dorny`x sistem v zone Poles`ya / S.V. Galkovskij, V.F. Galkovskij, D.V. Kuzemkin [i dr.] // Ekonomika i banki. 2012. № 1. S. 59–66.
4. Filatov V.A. Opy`t osusheniya pol`dorny`x zemel` kaliningradskoj oblasti. // Melioraciya zemel` v zone vliyaniya ravninny`x vodoxranilishh //Trudy` VASXNIL. M.: Kolos, 1974. S. 169–183.
5. Filatov V.A. Osobennosti stoka na zimnix pol`derax Nemanskoj nizmennosti Kaliningradskoj oblasti. // Konstrukciya i ispol`zovanie pol`dorny`x sistem: sb. tr. LitNIIGiM. Elgava: Gosizdat, 1981. S. 50–62.
6. Galkovskij V.F. Gidrologicheskij rezhim pol`derov Belorusskogo Poles`ya // Konstrukciya i ispol`zovanie pol`dorny`x sistem: sb. tr. LitNIIGiM. Elgava, 1981. S. 41–79.
7. Filatov V.A., Kovalev V.P. Raschet pol`dorny`x sistem s uchetom redukcii stoka // Melioraciya i vodnoe xozyajstvo. 2005. № 4. S. 31–34.
8. Alekseev G.A. Sxema rascheta maksimal`ny`x dozhdevy`x pavodkov po formule predel`noj intensivnosti osadkov s pomoshh`yu krivy`x redukcii osadkov i stoka // Trudy` GGI. 1966. Vy`p. 134. S. 44–50.
9. Aver`yanov S.F. Gorizonta`ny`j drenazh pri bor`be s zasoleniem oroshaemy`x zemel`. M.: Akademiya nauk, 1959. 84 s.
10. Kashhenko N.M., Kovalev V.P. Raschet linejny`x pol`dorny`x sistem // Problemy` ustojchivogo razvitiya melioracii i racional`nogo prirodozovaniya: materialy` yubilejnoy mezhdunarodnoj konferencii. M., 2007. S. 195–200.
11. Kashhenko N.M., Kovalev V.P., Vasil`ev V.V. Modelirovanie raboty` linejny`x pol`dorny`x sistem. Privedenie pol`dernoj sistemy` k linejnomu vidu // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii. 2013. T. 4. S. 108–112.
12. Die`l`ko-vlazhnostny`e xarakteristiki pochvenny`x obrazczov s razlichny`m sodержaniem gumusa v santimetrovom i decimetrovom diapazonax / P.P. Bobrov, T.A. Belyaeva, O.V. Galeev [i dr.] // Estestvenny`e nauki i e`kologiya: Ezhegodnik mGPU. 2001. S. 3–7.
13. Nerpin S., Xlopotenkov E. Obobshhenie zakona Darsi dlya sluchaev nelinejnoy fil`tracii v nenasy`shhenny`x i nasy`shhenny`x gruntax // Doklady` VASXNIL. 1970. № 11. S. 3–17.
14. Lundin K.P., Sverdlova L.B. Issledovanie strukturny`x por torfa s pomoshh`yu radioaktivny`x izotopov // Melioraciya i ispol`zovanie osushenny`x zemel`. Mn.: Urozhaj, 1966. S. 48–67.
15. Kolyasev F.E. rezul`taty` issledovaniya po dvizheniyu vody` v pochve pri razlichny`x vlazhnostyax // Sb. trudov po agronomicheskoy fizike. Vy`p. 4. M.-L.: LGIZ-SEL`XOZGIZ, 1948. S. 141–164.

16. Kashhenko N.M., Kovalev V.P. Raschet vlagoperenosa v pochve pri raschete parametrov drenazha pol`derny`x sistem // Innovacionny`e texnologii v melioracii: materialy` yubilejnoj mezhdunarodnoj konferencii. M., 2011. S. 79–84.
17. Kashhenko N.M., Kovalev V.P., Vasil`ev V.V. Modelirovanie raboty` linejny`x pol`derny`x sistem. Raschet perenosa vlagi v mezhdrennoj polose // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii. 2014. T. 1. S. 131–135.
18. Kashhenko N.M., Kovalev V.P., Vasil`ev V.V. Pol`derny`e sistemy` sel`skoxozyajstvennogo naznacheniya. Raschet parametrov rekonstruiruemy`x sistem // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii. 2019. № 4. S. 131–137.