

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6:626.8

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-1-22

Обоснование геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов систем капельного орошения садов

Виктор Николаевич Шкура¹, Андрей Сергеевич Штанько²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-469-6448>

²shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Аннотация. Цель: разработка методики определения геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов в системах капельного орошения садов. **Материалы и методы.** Теоретическую основу исследования составили известные зависимости для определения потерь напора в трубопроводах. Экспериментальные исследования потерь напора в оросительном трубопроводе проведены на опытной площадке лесопитомника Донлесхоза на модели оросительного трубопровода общей протяженностью 125 м с внутренним диаметром 57,6 мм. В рабочей части оросителя протяженностью 120 м с шагом 3,0 м устроены 40 водовыпусков, моделирующих поливные трубопроводы. Потери напора в пределах рабочей части оросителя определялись для четырех вариантов расхода поливных трубопроводов. **Результаты.** Для теоретического определения потерь напора в оросительном трубопроводе за основу принята адаптированная к условию дискретного равномерного отбора расхода по длине формула Дарси – Вейсбаха. Для условий опытного участка выполнен расчет потерь напора в оросительном трубопроводе с использованием семи известных расчетных зависимостей. Выявлены значимые расхождения в величинах потерь напора, которые составили 10,24–21,57 % от среднего, что предопределило необходимость проведения экспериментальных исследований. В результате анализа экспериментальных данных установлено значение корректирующего зависимость Дарси – Вейсбаха коэффициента $k_{кор} = 0,3575$, с учетом его произведен расчет потерь напора в оросителе, результаты которого имеют отклонение 2,6–6,0 % от опытных значений. **Выводы.** В результате исследований разработана методика определения геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов в системах капельного орошения садов, новизна которой заключается в использовании уточненного для условий систем капельного орошения корректирующего коэффициента, его применение позволит повысить точность определения потерь напора в оросительном трубопроводе в диапазоне числа Рейнольдса от 24509 до 147473.

Ключевые слова: капельное орошение, оросительная система, оросительные трубопроводы, гидравлика трубопроводов, потери напора, параметры трубопровода

Источник финансирования: субсидии на выполнение государственного задания № 082-00063-26 ПР за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Шкура В. Н., Штанько А. С. Обоснование геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов систем капельного орошения садов // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 1–22. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-1-22>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Justification of the geometric and hydraulic parameters of irrigation pipelines for drip irrigation systems of gardens

Viktor N. Shkura¹, Andrey S. Shtanko²

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹VNSnshkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

²shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

Abstract. Purpose: to develop a methodology for determining the geometric and hydraulic parameters of irrigation pipelines in drip irrigation systems for gardens. **Materials and methods.** The theoretical basis of the study was the known dependencies for determining pressure losses in pipelines. Experimental studies of pressure losses in an irrigation pipeline were conducted at the experimental site of the Donleskhoz forest nursery on the irrigation pipeline model with a total length of 125 m and an internal diameter of 57.6 mm. In the sprinkler's working section with a length of 120 m, 40 water outlets simulating irrigation pipelines are arranged with a step of 3.0 m. Pressure losses within the sprinkler's working section were determined for four variants of the irrigation pipeline flow rate. **Results.** For theoretical determination of pressure losses in an irrigation pipeline, the Darcy – Weisbach equation adapted to the condition of flow discrete uniform selection along its length was adopted. For the experimental site conditions, pressure losses in the irrigation pipeline were calculated using seven known calculation dependencies. Significant discrepancies in pressure losses amounting to 10.24–21.57 % of the average, were identified, which necessitated experimental studies. An analysis of the experimental data resulted in a Darcy – Weisbach correction coefficient of 0.3575. Taking this coefficient into account, the pressure losses in the sprinkler were calculated, the results of which deviate from the experimental values by 2.6–6.0 %. **Conclusions.** As a result of the research, a methodology for determining the geometric and hydraulic parameters of irrigation pipelines in drip irrigation systems for gardens was developed. The novelty of this methodology lies in the use of an adjusting factor refined for drip irrigation system conditions. Its application will improve the accuracy of determining pressure losses in irrigation pipelines in the Reynolds number range from 24,509 to 147,473.

Keywords: drip irrigation, irrigation system, irrigation pipelines, pipe hydraulics, pressure loss, pipeline parameters

Funding source: subsidies for the implementation of State Assignment No. 082-00063-26 PR are from the federal budget.

For citation: Shkura V. N., Shtanko A. S. Justification of the geometric and hydraulic parameters of irrigation pipelines for drip irrigation systems of gardens. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):1–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-1-22>.

Введение. В структуре оросительной сети систем капельного орошения различают магистральный, распределительные, оросительные и поливные трубопроводы. Оросительные трубопроводы (оросители), устанавливаемые и функционирующие в составе систем капельного орошения садов,

обеспечивают подвод поливной воды к единовременно поливаемым участкам капельного орошения. Оросители присоединяются к распределительным трубопроводам и обеспечивают питание поливных трубопроводов.

В реальной практике проектирования капельной поливной сети рассматриваются вопросы разработки компоновочно-конструктивных решений оросительных трубопроводов, включая: плановое и высотное расположение в составе сети и на участках капельного орошения; использование трубопроводов с одинаковым и переменным по длине диаметром; применение схем одно- и двухстороннего подключения к ним поливных трубопроводов (одно-, двух- и трехниточных поливных модулей); ведение гидравлических расчетов с целью определения потерь напора и диаметров труб. Указанные позиции проектирования оросительных трубопроводов с разной глубиной проработки рассмотрены в публикациях О. Е. Ясониди [1], Ю. А. Скобельцина [2], в ряде нормативных, справочных и методических изданий^{1, 2, 3, 4, 5}, а вопросы их гидравлического расчета в работах А. А. Федорца и др.⁶, П. М. Степанова и др.⁷, С. П. Ильина и др. [3]. Исследования в этой области продолжаются до настоящего времени [4–10], но обобща-

¹Штепа Б. Г., Носенко В. Ф., Винникова Н. В. Механизация полива: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 303 с.

²Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. М.: Колос, 1999. 432 с. EDN: WFINLZ.

³Проектирование и расчет дождевания и капельного орошения сельскохозяйственных культур: метод. пособие / В. В. Мелихов [и др.]; ВНИИОЗ. Волгоград, 2017. 184 с.

⁴Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: справочник / Г. В. Ольгаренко, В. И. Городничев, А. А. Алдошкин, В. И. Булгаков, Т. А. Капустина, И. А. Костоварова, С. С. Турапин, А. А. Терпигорев, А. В. Муравьев, С. С. Савушкин, С. М. Давшан, А. В. Грушин, С. Л. Шленов; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации. М.: Росинформагротех, 2015. 263 с. EDN: YSVGCX.

⁵Капельное орошение: пособие к СНиП 2.06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» [Электронный ресурс]: утв. Приказом Союзводпроекта от 11 апр. 1986 г. № 113. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁶Федорец А. А., Маланчук З. Р. Технические указания по гидравлическому расчету систем капельного орошения. Коломна, 1981. 456 с.

⁷Гидравлические расчеты систем орошения: учеб. пособие / П. М. Степанов [и др.]. Новочеркасск: НИМИ, 1984. 105 с.

ющие рекомендации по проектированию оросителей систем капельного орошения до настоящего времени не разработаны.

Указанное обстоятельство подтверждено в процессе разработки проекта капельно орошаемого питомника в Донлесхозе Красносулинского района Ростовской области. При обосновании проектного решения сети по известным методикам^{5, 6, 7} [1, 3, 4] выполнены расчеты потерь напора в оросительном трубопроводе со следующими параметрами: протяженность рабочего участка оросителя (участка с подсоединенными к нему поливными трубопроводами) – $(L_{op})_{p/y} = 120$ м; расход в начальном створе – $Q_0 = 0,006668$ м³/с; внешний и внутренний диаметры ПНД-трубы – $d_n = 63$ мм и $d_b = 57,6$ мм; количество подключенных поливных трубопроводов – $n_{п/т} = 40$ шт. с шагом $b_{м/п} = 3,0$ м и расходом каждого поливного трубопровода $q_{п/т} = 0,0001667$ м³/с. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов потерь напора в оросительном трубопроводе по известным зависимостям и методикам
Table 1 – Results of calculations of pressure losses in an irrigation pipeline using known dependencies and methods

Разработчик методики расчета	Расчетное значение потерь напора h_w , м	Среднее значение потерь напора $\bar{h}_w$, м	Относительное отклонение от среднего δ , %
НИМИ [1]	4,12	4,59	–10,24
НИМИ – КубГАУ ⁷	5,37		16,99
ВНИИГиМ [3]	3,83		–16,56
ВНИИОЗ [4]	3,60		–21,57
ВНИИМиТП ⁸	5,10		11,11
НПО Радуга ⁴	3,97		–13,51
СНиП ⁵	5,55		20,92

Приведенные в таблице 1 расчетные значения потерь напора h_w и сопоставление их с принятым в качестве условного эталона средним значением потерь напора в оросительном трубопроводе $\bar{h}_w$ свидетельствуют

⁸Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации систем капельного орошения: ВТР-11-28-81. М.: Минводхоз СССР, 1981. 180 с.

о наличии значимых расхождений в результатах расчета по рассмотренным методикам: от минус 10,24 до минус 21,57 % и от 11,11 до 20,92 %. Указанное обстоятельство предопределило необходимость проведения исследований, целью которых поставлена разработка методики определения геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов в системах капельного орошения садов.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнялись на опытно-производственной модели оросительного трубопровода общей протяженностью $(L_{ор})_{общ} = 125$ м; $(L_{ор})_{р/у} = 120$ м; $d_H = 63$ мм; $d_B = 57,6$ мм. Подача воды в ороситель осуществлялась насосом, обеспечивающим напор – $H = 1,5$ атм. при расходе $Q_0 = 0,006668$ м³/с. В холостой части оросительного трубопровода устроена задвижка, позволяющая регулировать подачу воды. В рабочей части оросителя с шагом $b_{м/п} = 3,0$ м устроены водовыпуски, моделирующие функционирование поливных трубопроводов, в количестве $n_{п/т} = 40$ шт.

При постановке эксперимента изменялись расходы водовыпусков $q_{в/в}$ исходя из их значений в моделируемых условиях: при длине поливных трубок – $l_{п/т} = 100$ м; шаге размещения капельниц – $l_{м/к} = 1,0$ м; количестве капельниц – $(n_{кап})_{п/т} = 100$ шт. и их расходах $q_{кап} = 1,0; 2,0; 4,0$ и $6,0$ л/ч. Расходы водовыпусков изменялись в диапазоне $0,0000277–0,0001667$ м³/с, а расходы оросителя соответственно $0,001108–0,006668$ м³/с. Расход каждого водовыпуска регулировался зажимом. Расходы водовыпусков устанавливались по объему воды в мерном баке и времени в процессе их тарировки. Потери напора в пределах рабочей части оросителя определялись по значениям манометров (ТМ-510 Р.00 М2, класс точности 1,5). Условия проведения четырех серий опытов и измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные экспериментального исследования на модели оросительного трубопровода

Table 2 – Data from the experimental study on the irrigation pipeline model

№ серии опытов	Расход водовыпусков $q_{в/в}$, м ³ /с	Расход оросителя $(Q_{о/т})_0$, м ³ /с	Скорость потока $(V_{о/т})_0$, м/с	Число Рейнольдса $(Re)_0$	Потери напора ΔH , м
1	0,0000277	0,001108	0,425	24509	0,18
2	0,0000556	0,002222	0,852	49106	0,60
3	0,0001111	0,004444	1,707	98300	2,25
4	0,0001667	0,006668	2,560	147473	4,60

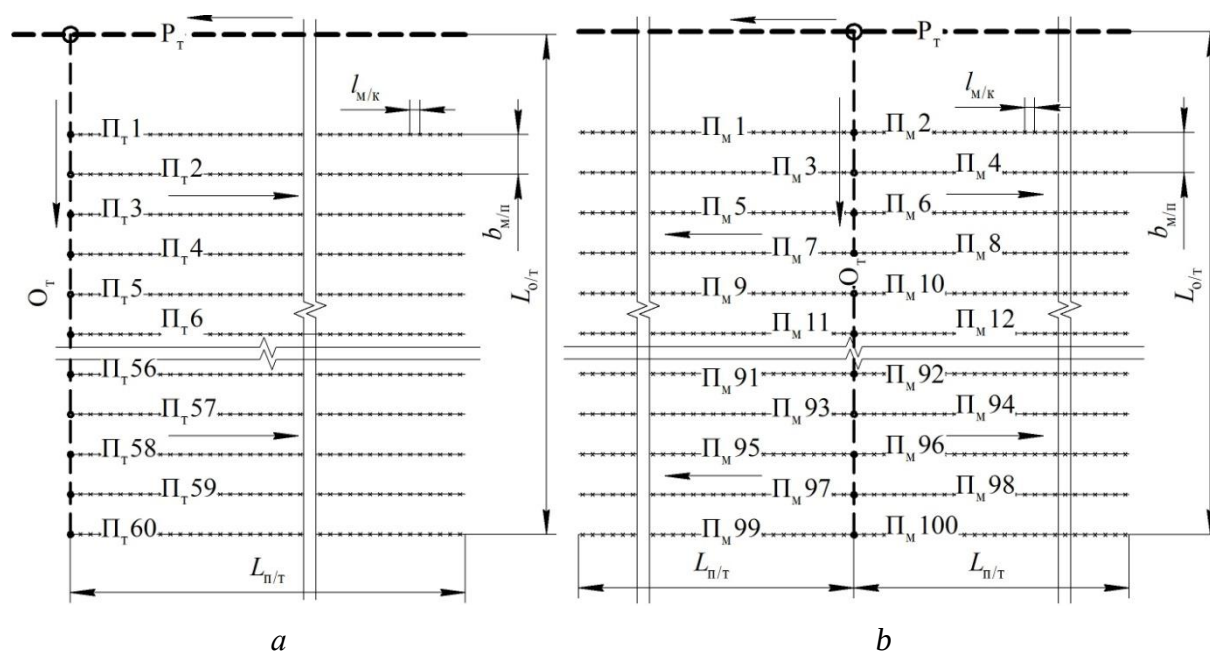
Результаты и обсуждение. Оросительный трубопровод является конструктивным элементом поливной сети, обеспечивающим питание водой поливных модулей. Конструктивное решение оросительного трубопровода увязывается с компоновочной схемой трубопроводной оросительной сети в пределах участкового модуля, компоновочным расположением и конструктивным исполнением узлов присоединения к нему поливных модулей, а его протяженность определяется размером стороны обслуживаемого им поливного участка. При компоновке оросительного модуля рассматриваются варианты одно- и двухстороннего присоединения поливных модулей к оросителю в соответствии со схемами, приведенными на рисунке 1.

В зависимости от условий капельного полива к оросителю подключают одно-, двух- и трехниточные поливные модули в соответствии с техническими решениями, проиллюстрированными на рисунке 2.

Оросительные трубопроводы протяженностью от 100 до 500 м рекомендуется трассировать по уклону земной поверхности поливного участка, что позволяет компенсировать потери напора по длине.

В конструктивном отношении оросители представляют собой пластмассовые трубопроводы диаметром от 50 до 200 мм. В начальном сечении (створе присоединения к распределительному трубопроводу) оросители оборудуются запорно-регулирующим устройством. При значениях давления в распределительном трубопроводе, превышающих номинальное для

применяемой капельной трубки, предусматривается установка регулятора давления. В зависимости от линейных, расходных и напорных характеристик могут устраиваться оросители с неизменным и переменным (уменьшающимся) по длине диаметрами труб. В конструкции оросительного трубопровода выделяют начальный «холостой» участок, обеспечивающий подвод воды от распределителя к его рабочей части – участку присоединения к оросителю поливных трубопроводов (рисунок 3).

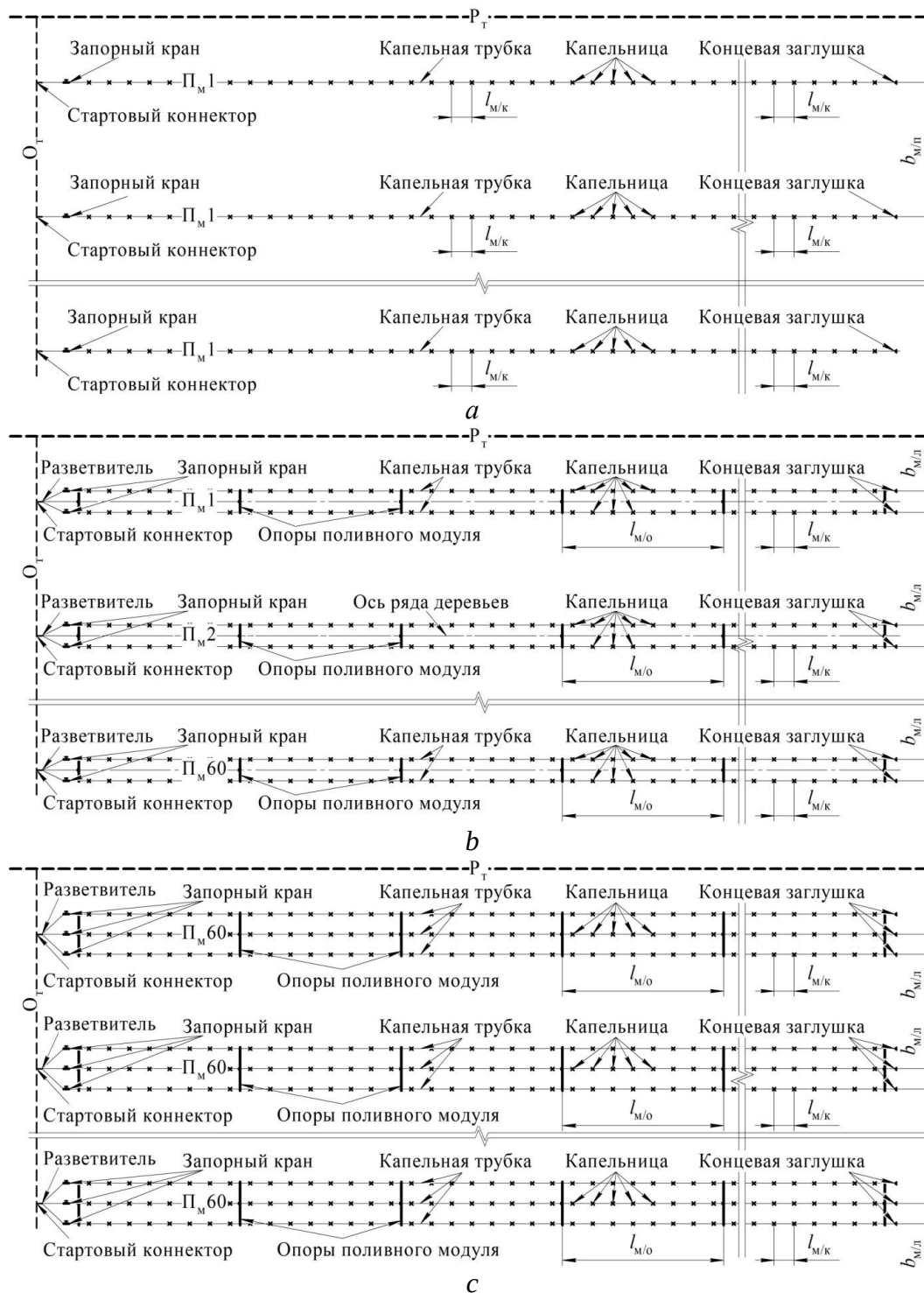


P_T – распределитель; O_T – ороситель; $П_T$ – поливной трубопровод;
 $L_{O/T}$ – протяженность оросителя; $L_{П/T}$ – протяженность поливного трубопровода;
 $b_{м/п}$ – расстояние между поливными модулями (трубопроводами);
 $l_{м/к}$ – шаг капельниц; → указатели направления течения жидкости в трубопроводах

P_T – distributor; O_T – sprinkler; $П_T$ – irrigation pipeline; $L_{O/T}$ – sprinkler length;
 $L_{П/T}$ – irrigation pipeline length; $b_{м/п}$ – distance between irrigation modules (pipelines);
 $l_{м/к}$ – emitter spacing; → flow direction indicators in pipelines

Рисунок 1 – Компоновочные схемы оросительного модуля с односторонним (a) и двухсторонним (b) подключением поливных трубопроводов к оросителю

Figure 1 – Layout diagrams of an irrigation module with one-way (a) and two-way (b) connections of irrigation pipelines to the sprinkler



$l_{м/к}$ – шаг капельниц; $b_{м/л}$ – расстояние между поливными модулями;

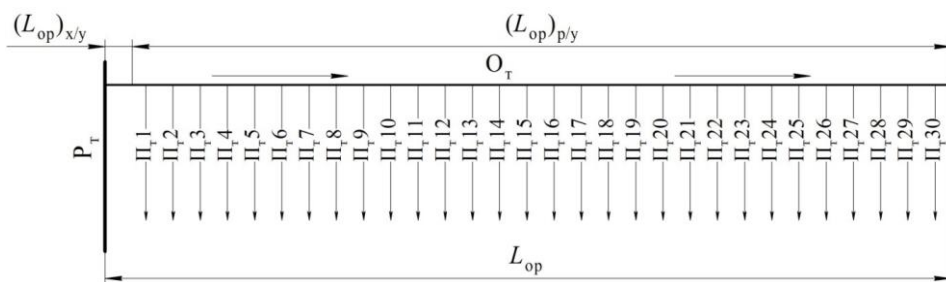
$b_{м/л}$ – расстояние между поливными линиями в модуле

$l_{м/к}$ – emitter spacing; $b_{м/л}$ – distance between irrigation modules;

$b_{м/л}$ – distance between irrigation lines in a module

Рисунок 2 – Схемы подключения к оросительному трубопроводу одно- (а), двух- (б) и трехниточного (с) поливных модулей

Figure 2 – Connection diagrams to the irrigation pipeline for single-line (a), double-line (b), and triple-line (c) irrigation modules



P_T – распределительный трубопровод; O_T – оросительный трубопровод;
 Π_T – поливные трубопроводы ($\Pi_{T1} - \Pi_{T30}$); L_{op} – общая протяженность оросителя;
 $(L_{op})_{x/y}$ – длина холостого участка оросителя; $(L_{op})_{p/y}$ – протяженность расчетного участка; $\rightarrow$ указатели направления течения жидкости в трубопроводах
 P_T – distribution pipeline; O_T – irrigation pipeline; Π_T – irrigation pipelines ($\Pi_{T1} - \Pi_{T30}$);
 L_{op} – sprinkler's total length; $(L_{op})_{x/y}$ – sprinkler's idle section length;
 $(L_{op})_{p/y}$ – calculated section length; $\rightarrow$ flow direction indicators in pipelines

**Рисунок 3 – Схема оросительного трубопровода, питающего
однониточные поливные модули при одностороннем присоединении**
**Figure 3 – Scheme of an irrigation pipeline feeding single-line
irrigation modules with one-way connection**

Диаметр оросителя принимается с учетом обеспечения пропуска расчетного расхода воды при допустимых значениях потерь напора и обеспечении требуемых значений давления в трубопроводе. Указанные характеристики определяются гидравлическим расчетом, разработка методики которого определена одной из задач настоящего исследования. На начальном этапе исследования рассмотрена возможность использования известных разработок в этой области^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} [1, 3, 4 и др.]. Оценка возможности их применения осуществлена расчетами, выполненными для условий устройства оросительных трубопроводов питомника в Донлесхозе Ростовской области, результаты этих расчетов приведены в таблице 1.

При обработке приведенных в таблице 2 опытных данных и установлении полуэмпирической зависимости для определения потерь напора в оросительном трубопроводе за теоретическую основу приняты:

- записанная в авторских обозначениях формула Дарси – Вейсбаха⁹:

⁹Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. 5-е изд. М.: Энергия, 1974. 313 с.

$$h_w = (\lambda_{o/t})_0 \cdot \frac{L_{o/t}}{(d_{o/t})_B} \cdot \frac{(V_{o/t})_0^2}{2g}; \quad (1)$$

- адаптированная к условиям оросительного трубопровода с равномерной и постоянной по длине раздачей расхода по длине зависимость [4]:

$$h_w = \frac{1}{3} (\lambda_{o/t})_0 \cdot \frac{L_{o/t}}{(d_{o/t})_B} \cdot \frac{(V_{o/t})_0^2}{2g}, \quad (2)$$

где h_w – потери напора в оросительном трубопроводе, м;

$(\lambda_{o/t})_0$ – параметр Дарси в начальном сечении оросителя [11]:

$$(\lambda_{o/t})_0 = 0,275 / (\text{Re}_d)_0^{0,23}, \quad (3)$$

где $(\text{Re}_d)_0$ – число Рейнольдса для потока в начальном сечении⁹:

$$(\text{Re}_d)_0 = (V_{o/t})_0 \cdot (d_{o/t})_B / \nu, \quad (4)$$

где $(V_{o/t})_0$ – средняя скорость в начальном сечении оросителя, м/с:

$$(V_{o/t})_0 = (Q_{o/t})_0 / (\omega_{o/t})_B, \quad (5)$$

где $(Q_{o/t})_0$ – расход трубопровода в начальном сечении, м³/с;

$(\omega_{o/t})_B$ – площадь живого сечения оросителя в начальном створе, м²:

$$(\omega_{o/t})_B = 0,785 \cdot (d_{o/t})_B^2, \quad (6)$$

где $(d_{o/t})_B$ – внутренний диаметр оросительного трубопровода, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с;

$\frac{1}{3}$ – корректирующий коэффициент ($k_{\text{кор}}$), учитывающий влияние от-

бора расхода поливной воды из транспортируемой по оросителю [4];

$L_{o/t}$ – протяженность рабочей части оросительного трубопровода, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Задачей камеральной обработки определено установление значений корректирующего коэффициента, учитывающего отличие условий течения водного потока по оросительному трубопроводу, заключающихся в дискретности отбора расхода по длине трубопровода. Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения корректирующего коэффициента
Table 3 – Results of determining the adjustment factor

№ серии опытов	Расход оросителя $(Q_{o/т})_0$, м ³ /с	Потери напора $(h_w)_1$ по (1), м	Потери напора $(h_w)_2$ по (2), м	Потери напора в опыте $(h_w)_{оп}$, м	$k_{кор} = \frac{(h_w)_{оп}}{(h_w)_1}$
1	0,001108	0,517	0,172	0,18	0,348
2	0,002222	1,772	0,590	0,60	0,339
3	0,004444	6,045	2,013	2,25	0,372
4	0,006668	12,400	4,129	4,60	0,371

В соответствии с данными таблицы 3 средняя по четырем сериям опытов величина корректирующего коэффициента составила $k_{кор} = 0,3575$, с учетом которого зависимости (1) и (2) приобретают вид:

$$h_w = 0,3575 \cdot (\lambda_{o/т})_0 \cdot \frac{L_{o/т}}{(d_{o/т})_в} \cdot \frac{(V_{o/т})_0^2}{2g}. \quad (7)$$

Применительно к расчету оросительных трубопроводов систем капельного орошения зависимость (7) более приемлемо использовать в виде:

$$h_w = 0,3575 \cdot \frac{0,275}{Re_0^{0,23}} \cdot \frac{L_{o/т}}{(d_{o/т})_в} \cdot \frac{(V_{o/т})_0^2}{2g} \text{ или} \quad (8)$$

$$h_w = 0,00774 \cdot \frac{Q_{o/т}^{1,77} \cdot L_{o/т} \cdot v^{0,23}}{(d_{o/т})_0^{4,77}}. \quad (9)$$

При известном или заданном значении потерь напора в оросительном трубопроводе h_w задача гидравлического расчета сводится к определению внутреннего диаметра оросителя $(d_{o/т})_в$, м, с использованием зависимости:

$$(d_{o/т})_в = 0,361 \cdot \frac{Q_{o/т}^{0,371} \cdot L_{o/т}^{0,21} \cdot v^{0,048}}{h_w^{0,21}}. \quad (10)$$

Апробация зависимостей (8) и (9) проведена сопоставлением с результатами расчета потерь напора по зависимостям А. Е. Новикова и др. [4], Е. О. Ясониди и др. [5] (таблица 4).

Приведенные в таблице 4 данные свидетельствуют о более высокой

точности расчетов и большем совпадении с опытными значениями h_w , определенных по зависимостям (8) и (9), в сопоставлении с известными.

Таблица 4 – Результаты сопоставления опытных значений потерь напора с определенными по предложенной зависимости и известным зависимостям других авторов

Table 4 – Results of comparison of experimental values of pressure losses with those determined according to the proposed dependence and known dependences of other authors

№ опыта	Опытное значение потерь напора $(h_w)_{оп}$, м	Потери напора h_w по зависимостям (6) и (7), м	Отклонение δ , %	Потери напора по известным зависимостям h_w и их отклонения δ			
				по Д. П. Гостищеву и О. Е. Ясониди [5]		по А. Е. Новикову и М. И. Ламсковой [4]	
				h_w , м	δ , %	h_w , м	δ , %
1	0,18	0,185	–2,8	0,237	–31,7	0,162	+10,0
2	0,60	0,636	–6,0	0,723	–12,0	0,547	+8,8
3	2,25	2,191	2,6	2,192	2,6	1,893	+15,9
4	4,60	4,460	3,0	4,195	8,8	3,750	+18,5

Зависимости (7)–(9) приемлемы для расчета оросительных трубопроводов с параметрами: шагом расположения поливных трубопроводов 3,0 м в диапазоне значений числа Рейнольдса от 24509 до 147473.

Полученные зависимости положены в основу методики гидравлического расчета оросительных трубопроводов, задачей которого является определение диаметров труб и потерь напора, при которых в заданных условиях их функционирования будет выдерживаться требуемое давление в трубопроводе. В качестве основных ограничений по параметрам оросительных трубопроводов приняты нижеследующие.

1 Перепад давлений по длине трубопровода ΔP не должен превышать 10 % от номинального давления на капельнице $P_{ном}$, м [1].

Перепад давлений, м, в оросителе определяется по соотношению:

$$\Delta P = \Delta Z - h_w, \quad (11)$$

где ΔZ – перепад отметок местности в начальном и конечном створах расчетного (рабочего или холостого) участка трубопровода, определяемый в соответствии с расчетной схемой (см. рисунок 3), м;

h_W – потери напора в оросительном трубопроводе, м.

2 Внутренний диаметр трубопровода, м, и площадь его поперечного сечения принимаются исходя из условия не превышения скорости водного потока 3,0 м/с по соотношению:

$$d_{o/T} \leq 1,535 \sqrt{Q_{o/T}}, \quad (12)$$

где $Q_{o/T}$ – расход оросителя в головном сечении, м³/с.

Гидравлическому расчету оросительного трубопровода предшествует разработка компоновочного решения капельной поливной сети (оросительного модуля), обеспечивающей орошение древесно-плодовых культур, возделываемых в садовой клетке, и установление исходных данных, условий и ограничений, в качестве которых рассматриваются нижеследующие.

1 Компоновочное решение капельной поливной сети, обеспечивающей капельное орошение древесно-плодовых культур, возделываемых в пределах садовой клетки. В соответствии с предварительно разработанной компоновочной схемой оросительного модуля определяются: протяженность оросительного трубопровода L_{op} , м (включая длины входной $(L_{op})_{x/y}$, м, и рабочей $(L_{op})_{p/y}$, м, его частей): $L_{op} = (L_{op})_{x/y} + (L_{op})_{p/y}$; количество питающихся из него модулей n_m или линий $n_{л}$ и схема (одно- или двухстороннего) присоединения модулей и линий к оросителю, характеризуемая расстояниями между линиями $b_{м/л}$, м, или поливными модулями $b_{м/п}$, м (см. рисунок 2), величины отметок поверхности земли в начальном Z_n и конечном Z_k створах рассчитываемого участка оросительного трубопровода.

2 Принятые по каталогу серийно изготавливаемых капельниц и капельных трубок значения номинального рабочего давления $P_{ном}$, атм., максимально допустимого давления P_{max} , атм., и диапазона компенсации давлений капельницами в поливном трубопроводе $\Delta P_{ком}$, атм.

3 Данные о температуре среды и поливной воды, а также расчетном значении кинематического коэффициента вязкости жидкости ν , м²/с.

Предлагаемая методика гидравлического расчета оросительного трубопровода заключается в выполнении следующих расчетных операций.

1 Определяется расход оросителя, м³/с, в его начальном створе:

$$Q_{o/t} = q_{\text{кап}} \cdot (n_{\text{кап}})_{п/т} \cdot n_{п/т} \text{ или} \quad (13)$$

$$Q_{o/t} = q_{п/т} \cdot n_{п/т}, \quad (14)$$

где $q_{\text{кап}}$ – расход одной капельницы, м³/с;

$(n_{\text{кап}})_{п/т}$ – количество капельниц на одном поливном трубопроводе, шт.;

$n_{п/т}$ – количество поливных трубопроводов на оросителе, шт.;

$q_{п/т} = q_{\text{кап}} \cdot (n_{\text{кап}})_{п/т}$ – расход поливного трубопровода, м³/с.

При присоединении к оросителю поливных трубопроводов разной длины расход, м³/с, в начальном сечении определяется по соотношению:

$$Q_{o/t} = q_{\text{кап}} \cdot \sum (n_{\text{кап}})_{o/t}, \quad (15)$$

где $\sum (n_{\text{кап}})_{o/t}$ – количество капельниц на всех поливных трубопроводах, подкомандных оросителю в пределах поливного участка, шт.

2 Определяется величина допустимого перепада давлений ΔP , м, между начальным и конечным сечениями оросительного трубопровода:

$$\Delta P = 0,1 \cdot P_{\text{ном}}. \quad (16)$$

Допустимый перепад давлений в оросительном трубопроводе влияет на равномерность капельного полива, определяется параметрами используемых капельных трубок и составляет не более 10 % от номинального рабочего давления $P_{\text{ном}}$ принятых капельниц [1].

3 Устанавливается величина перепада отметок местности, м, по длине рабочего участка оросителя как разность отметок поверхности земли в его начальном $(Z_n)_{п/у}$ и конечном $(Z_k)_{п/у}$ створах по соотношению:

$$(\Delta Z_{o/t})_{п/у} = (Z_n)_{п/у} - (Z_k)_{п/у}. \quad (17)$$

4 Рассчитывается предельное значение потерь напора, м, в границах рабочего участка оросительного трубопровода:

$$((h_w)_{\text{пред}})_{\text{п/у}} = \Delta P - (\Delta Z_{\text{о/т}})_{\text{п/у}}. \quad (18)$$

5 По зависимости (10) рассчитывается величина внутреннего диаметра оросительного трубопровода $d_{\text{о/т}}$, при котором обеспечивается величина потерь напора, соответствующая $((h_w)_{\text{пред}})_{\text{п/у}}$.

6 Определенная в п. 2 величина диаметра рабочего участка оросительного трубопровода $d_{\text{о/т}}$ проверяется на соблюдение условия (12).

7 Принимается ближайшее к расчетному значению внутреннего диаметра индустриально производимой пластмассовой трубы оросителя, и по зависимости (7) определяется величина потерь напора в пределах рабочего участка оросительного трубопровода $(h_w)_{\text{п/у}}$.

8 При соблюдении условия $(h_w)_{\text{п/у}} < ((h_w)_{\text{пред}})_{\text{п/у}}$ расчет на рабочем участке завершается и установленные значения диаметра оросительного трубопровода $d_{\text{о/т}}$ и потерь напора $(h_w)_{\text{п/у}}$ для рабочего участка принимаются за расчетные. При несоблюдении указанного условия изменяют значение диаметра рабочего участка оросителя $d_{\text{о/т}}$ и расчет повторяют.

9 Потери напора, м, на холостом участке оросительного трубопровода определяются по зависимости:

$$(h_w)_{\text{х/у}} = \frac{0,275}{\text{Re}_{\text{х/у}}^{0,23}} \cdot \frac{(L_{\text{ор}})_{\text{х/у}}}{d_{\text{о/т}}} \cdot \frac{\bar{V}_{\text{х/у}}^2}{2g}, \quad (19)$$

где $\text{Re}_{\text{х/у}} = V_{\text{х/у}} \cdot d_{\text{о/т}} / \nu$ – число Рейнольдса, определенное для потока жидкости, протекающей по холостому участку оросительного трубопровода;

$(L_{\text{ор}})_{\text{х/у}}$ – протяженность холостого участка оросителя, м;

$d_{\text{о/т}}$ – диаметр холостого участка оросительного трубопровода, принимаемый равным диаметру рабочего участка, м;

$V_{\text{х/у}} = Q_0 / \omega_{\text{о/т}}$ – средняя скорость потока на холостом участке, м.

10 Определяются потери напора на запорно-регулирующем устройстве оросителя $(h_w)_{з/р}$ по известным в гидравлике рекомендациям⁷.

11 По установленному в п. 9 значению $(h_w)_{х/у}$ и величине перепада отметок местности вычисляется величина изменения давления, м, на холостом участке оросительного трубопровода:

$$\Delta P_{p/y} = \Delta Z_{x/y} - (h_w)_{x/y}. \quad (20)$$

12 Устанавливаются общие потери напора, м, в оросительном трубопроводе суммированием значений h_w по рабочему и холостому участкам:

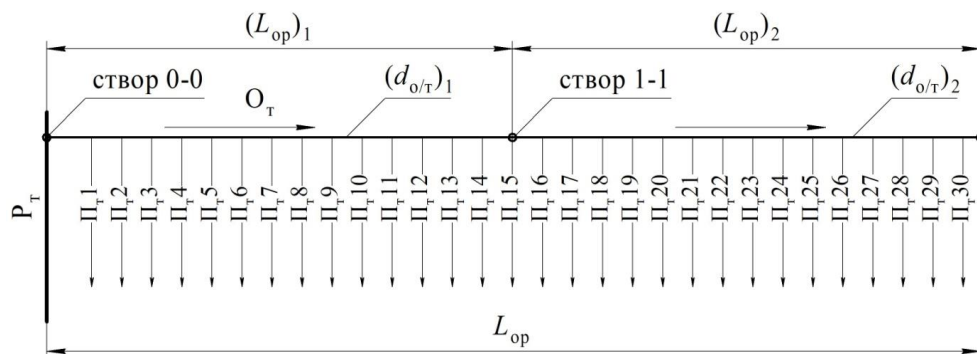
$$(h_w)_{o/t} = (h_w)_{p/y} + (h_w)_{x/y} + (h_w)_{з/р}. \quad (21)$$

13 По полученному значению $(h_w)_{o/t}$ определяется расчетная величина перепада давлений, м, в оросительном трубопроводе по соотношению:

$$\Delta P_{o/t} = \Delta Z_{o/t} - (h_w)_{o/t}. \quad (22)$$

Оросительные трубопроводы систем капельного орошения садов устраиваются и функционируют в широком спектре геометрических, топографических, расходно-скоростных, напорных, технологических и технических условий. При определенных параметрах указанных условий и их сочетаниях обеспечить соблюдение предъявляемых к оросителям требований при использовании труб одного диаметра не представляется возможным. В этом случае рассматриваются варианты устройства оросителей из труб разного диаметра в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.

Расчет линейных и гидравлических параметров оросительного трубопровода с переменным диаметром, обеспечивающих соблюдение приведенных выше ограничений, осуществляется по расчетным участкам, характеризующимся протяженностью $(L_{op})_1$, $(L_{op})_2$ и диаметрами $(d_{o/t})_1$, $(d_{o/t})_2$.



P_t – распределительный трубопровод; O_t – оросительный трубопровод;
 Π_t – поливные трубопроводы ($\Pi_{т1} - \Pi_{т30}$); $L_{оп}$ – общая протяженность оросителя;
 $(L_{оп})_1$ – протяженность расчетного участка 1; $(L_{оп})_2$ – протяженность расчетного участка 2; $(d_{о/т})_1$ – диаметр расчетного участка 1; $(d_{о/т})_2$ – диаметр расчетного участка 2; $\rightarrow$ указатели направления течения жидкости в трубопроводах
 P_t – distribution pipeline; O_t – irrigation pipeline; Π_t – irrigation pipelines ($\Pi_{т1} - \Pi_{т30}$);
 $L_{оп}$ – sprinkler total length; $(L_{оп})_1$ – design section 1 length; $(L_{оп})_2$ – design section 2 length; $(d_{о/т})_1$ – design section 1 diameter; $(d_{о/т})_2$ – design section 2 diameter; $\rightarrow$ flow direction indicators in pipelines

Рисунок 4 – Схема оросительного трубопровода, устраиваемого из труб переменного сечения

Figure 4 – Scheme of an irrigation pipeline, arranged of pipes of variable cross-section

Расчет выполняется в нижеследующей последовательности.

1 Задаются значениями $(d_{о/т})_2$ и $(L_{оп})_2$ и по зависимости (9) определяют величину потерь напора на втором (концевом) участке трубопровода $(h_w)_2$ (см. рисунок 4). Расчет ведется при соответствующем этому участку и створу 1 – 1 расходе $(Q_{о/т})_{1-1}$, определяемом суммированием расходов поливных трубопроводов $q_{п/т}$, питающихся из рассматриваемого участка.

2 Определяется расход, м³/с, оросителя $(Q_{о/т})_{0-0}$ в головном створе 0 – 0:

$$(Q_{о/т})_{0-0} = (Q_{о/т})_{1-1} + q_{п/т} \cdot (n_{п/т})_1, \quad (23)$$

где $(n_{п/т})_1$ – количество поливных трубопроводов, питающихся из первого (головного) участка трубопровода, шт.

3 Определяют протяженность первого участка $(L_{оп})_1$ и задаются сортаментным значением диаметра трубопровода $(d_{о/т})_1 > (d_{о/т})_2$.

4 Устанавливается величина потерь напора, м, на первом участке $(h_w)_1$ с использованием зависимости:

$$(h_w)_1 = \left(0,3575 + 0,64 \cdot \frac{(Q_{o/t})_{1-1}}{(Q_{o/t})_{0-0}} \right) \cdot (\lambda_{o/t})_1 \frac{(L_{o/t})_1}{(d_{o/t})_1} \cdot \frac{(V_{o/t})_1^2}{2g}, \quad (24)$$

где $(\lambda_{o/t})_1 = \frac{0,275}{(Re_{o/t})_1^{0,23}}$ – параметр, характеризующий гидравлическое со-

противление протеканию потока по расчетному участку оросителя;

$(Re_{o/t})_1 = \frac{(V_{o/t})_{0-0} \cdot (d_{o/t})_1}{\nu}$ – число Рейнольдса, определяемое для условий

сечения 0 – 0 оросительного трубопровода;

$(V_{o/t})_{0-0} = (Q_{o/t})_{0-0} / (\omega_{o/t})_1$ – скорость потока в сечении 0 – 0, м/с;

$(\omega_{o/t})_1 = 0,785 \cdot (d_{o/t})_1^2$ – площадь поперечного сечения оросителя, м².

5 Устанавливаются значения потерь напора на холостом участке оросителя $(h_w)_{x/y}$ по зависимости (17), и с их учетом определяются общие потери напора $(h_w)_{o/t}$ и перепад давлений $\Delta P_{o/t}$ в оросителе.

6 Проверяется соблюдение условия (16), и полученные параметры трубопроводов принимаются за расчетные. При несоблюдении условия изменяются $(L_{op})_1$, $(d_{o/t})_1$, $(L_{op})_2$ и $(d_{o/t})_2$ и расчет повторяется.

Выводы

1 На примере условий оросительной сети питомника в Донлесхозе Ростовской области выполнен расчет потерь напора в оросительном трубопроводе с использованием семи известных расчетных зависимостей. В результате установлены значимые расхождения в величинах потерь напора в оросительном трубопроводе, которые составили 10,24–21,57 % от среднего, что предопределило необходимость проведения экспериментальных исследований геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов в системах капельного орошения садов.

2 Гидравлические исследования на модели оросительного трубопро-

вода позволили получить опытные данные, отражающие потери напора в оросительном трубопроводе, для четырех вариантов расхода подключенных к нему поливных трубопроводов. При обработке опытных данных и установлении зависимости для определения потерь напора в оросительном трубопроводе за основу принята адаптированная к условиям функционирования оросителя формула Дарси – Вейсбаха. В процессе камеральной обработки установлены значения корректирующего коэффициента, учитывающего отличие условий течения водного потока по оросительному трубопроводу, заключающихся в дискретности отбора расхода по длине трубопровода, для условий проведения опытов коэффициент составил в среднем $k_{\text{кор}} = 0,3575$. С учетом предложенного значения коэффициента был произведен расчет по зависимости Дарси – Вейсбаха для условий опыта, результаты которого имеют отклонение 2,6–6,0 % от опытных значений, что значительно меньше отклонений рассчитанных по известным зависимостям величин от опытных данных, составляющих до 18,5 %.

3 В результате исследований разработана методика определения геометрических и гидравлических параметров оросительных трубопроводов в системах капельного орошения садов, задачей ее является определение диаметра трубопровода и потерь напора в нем, при которых в заданных условиях его работы будет выдерживаться требуемое давление в трубопроводе. Новизна методики заключается в использовании уточненного для условий систем капельного орошения корректирующего коэффициента, применение которого позволит повысить точность определения потерь напора в оросительном трубопроводе, а также в обеспечении перепада давлений по длине оросительного трубопровода не более 7 %, что в свою очередь обеспечит требуемую равномерность полива компенсирующими капельницами в пределах садовой клетки плодового сада. Разработанная методика позволяет производить расчет потерь напора в оросительном

трубопроводе, устраиваемом как из труб одного диаметра на всей протяженности, так и с уменьшающимися диаметрами труб по длине оросительного трубопровода.

Список источников

1. Ясониди О. Е. Капельное орошение: монография. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с. EDN: QLCBER.
2. Скобельцин Ю. А., Гумбаров А. Д. Системы капельного орошения. Краснодар: КСХИ, 1985. 133 с.
3. Ильин С. П., Хроль С. Б., Гросман Ю. И. Гидравлический расчет трубопроводной сети для систем капельного орошения // Новое в технике и технологии полива: сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ механизации и техники полива. М., 1978. Вып. 11. С. 106–114.
4. Новиков А. Е., Ламскова М. И. Исследование потерь напора и равномерности расхода жидкостей в капельных трубопроводах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2(34). С. 203–209. EDN: SFFLAZ.
5. Ясониди О. Е., Ясониди О. Е., Гостищев Д. П. Гидравлические исследования поливных трубопроводов с капельницами // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 1. С. 33–39. EDN: YQRJKN.
6. Хасан М., Алматар А., Кузнецов Е. В. Расчет потерь напора в трубопроводах систем капельного орошения // Экология речных ландшафтов: сб. ст. по материалам IV Междунар. науч. экол. конф., г. Краснодар, 3 дек. 2019 г. Краснодар: КубГАУ им. И. Т. Трубилина, 2020. С. 212–219. EDN: OOX SXU.
7. Evaluation of hydraulic performance of a small-scale drip irrigation system / T. Akter, S. Niloy, M. H. Rahman, M. N. N. Mazumder // Turkish Journal of Agricultural Engineering Research. 2025. Vol. 6, № 2. P. 134–150. DOI: 10.46592/turkager.1657442. EDN: UYFBWQ.
8. Математическое моделирование движения жидкости в поливных и участковых трубопроводах систем капельного орошения / А. К. Семерджян, В. И. Орехова, Л. Н. Кондратенко, К. В. Мельник, Д. В. Чичкин // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 4. С. 7–10. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-7-10. EDN: USTWWZ.
9. Лытов М. Н. Гидравлические исследования поливного модуля системы комбинированного орошения // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 2. С. 74–93. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-2-74-93. EDN: BLWSEO.
10. Ишанов Ж. Х. Гидравлический расчет неустановившегося движения воды в трубах системы капельного орошения // Экономика и социум. 2024. № 5-2(120). С. 1093–1101. EDN: REEWSA.
11. Штанько А. С., Шкура В. Н. Обоснование параметров магистральных и распределительных трубопроводов оросительной сети систем капельного орошения // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 16–34. DOI: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-16-34.

References

1. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie: monografiya* [Drip Irrigation: monograph]. Novocherkassk, Lick Publ., 322 p., EDN: QLCBER. (In Russian).
2. Skobeltsin Yu.A., Gubarov A.D., 1985. *Sistemy kapel'nogo orosheniya* [Drip Irrigation Systems]. Krasnodar, KSHI, 133 p. (In Russian).

3. Ilyin S.P., Khrol S.B., Grosman Yu.I., 1978. *Gidravlicheskiy raschet truboprovodnoy seti dlya sistem kapel'nogo orosheniya* [Hydraulic calculation of the pipeline network for drip irrigation systems]. *Novoe v tekhnike i tekhnologii poliva: sb. nauch. tr. Vsesoyuz. NII mekhanizatsii i tekhniki poliva* [New in Irrigation Engineering and Technology: coll. of sci. papers of the All-Union Research Institute of Irrigation Mechanization and Engineering]. Moscow, iss. 11, pp. 106-114. (In Russian).

4. Novikov A.E., Lamskova M.I., 2014. *Issledovanie poter' napora i ravnomernosti raskhoda zhidkostey v kapel'nykh truboprovodakh* [The study of pressure losses and uniformity of flow rate in drip pipelines]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 2(34), pp. 203-209, EDN: SFFLAZ. (In Russian).

5. Yasonidi E.O., Yasonidi O.E., Gostishchev D.P., 2018. *Gidravlicheskie issledovaniya polivnykh truboprovodov s kapel'nitsami* [Hydraulic researches of irrigation conduits with emitters]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 1, pp. 33-39, EDN: YQRJKH. (In Russian).

6. Hasan M., Almatar A., Kuznetsov E.V., 2020. *Raschet poter' napora v truboprovodakh sistem kapel'nogo orosheniya* [Calculation of pressure losses in pipes of drip irrigation systems]. *Ekologiya rechnykh landshaftov: sb. st. po materialam IV Mezhdunar. nauch. ekol. konferentsii* [Ecology of River Landscapes: Coll. Articles of the Proc. of the IV International Scientific Ecological Conference]. Krasnodar, KubSAU named after I. T. Trubilin, pp. 212-219, EDN: OOXSXU. (In Russian).

7. Akter T., Niloy S., Rahman M.H., Mazumder M.N.N., 2025. Evaluation of hydraulic performance of a small-scale drip irrigation system. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 6, no. 2, pp. 134-150, DOI: 10.46592/turkager.1657442, EDN: UYFBWQ.

8. Semerdzhyan A.K., Orekhova V.I., Kondratenko L.N., Melnik K.V., Chichkin D.V., 2023. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya zhidkosti v polivnykh i uchastkovykh truboprovodakh sistem kapel'nogo orosheniya* [Mathematical modeling of water flow in irrigation and section pipes of drip irrigation systems]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4, pp. 7-10, DOI: 10.32962/0235-2524-2023-4-7-10, EDN: USTWWZ. (In Russian).

9. Lytov M.N., 2024. *Gidravlicheskie issledovaniya polivnogo modulya sistemy kombinirovannogo orosheniya* [Hydraulic studies of the irrigation module of the combined irrigation system]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 14, no. 2, pp. 74-93, DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-2-74-93, EDN: BLWSEO. (In Russian).

10. Ishanov Zh.Kh., 2024. *Gidravlicheskiy raschet neustanovivshegosya dvizheniya vody v trubakh sistemy kapel'nogo orosheniya* [Hydraulic calculation of unsteady water flow in pipes of a drip irrigation system]. *Ekonomika i sotsium* [Economy and Society], no. 5-2(120), pp. 1093-1101, EDN: REEWSA. (In Russian).

11. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2026. *Obosnovanie parametrov magistral'nykh i raspreditel'nykh truboprovodov orositel'noy seti sistem kapel'nogo orosheniya* [Justification of parameters of main and distribution pipelines of the irrigation network of drip irrigation systems]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 16, no. 2, pp. 16-34, DOI: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-16-34. (In Russian).

Информация об авторах

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), VNShkura@yandex.ru, AuthorID: 734199, ORCID: 0000-0002-4639-6448;

А. С. Штанько – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), shtanko.77@mail.ru, AuthorID: 619732, ORCID: 0000-0002-6699-5245.

Information about the authors

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novo-cherkassk, Baklanovsky ave., 190), VNShkura@yandex.ru, AuthorID: 734199, ORCID: 0000-0002-4639-6448;

A. S. Shtanko – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novo-cherkassk, Baklanovsky ave., 190), shtanko.77@mail.ru, AuthorID: 619732, ORCID: 0000-0002-6699-5245.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 16.07.2026;
принята к публикации 17.09.2026.
The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 16.07.2026; accepted for
publication 17.09.2026.*