

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-16-34

Обоснование параметров магистральных и распределительных трубопроводов оросительной сети систем капельного орошения

Андрей Сергеевич Штанько¹, Виктор Николаевич Шкура²

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

¹shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

²VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

Аннотация. Цель: установление расчетных зависимостей и разработка методики обоснования параметров магистральных и распределительных трубопроводов, устраиваемых в составе оросительной сети систем капельного орошения. **Материалы и методы.** В основу методики обоснования параметров положена классическая формула Дарси – Вейсбаха для установления потерь напора в трубопроводах, известные зависимости и данные авторского исследования, посвященного определению значений коэффициента гидравлического сопротивления потоку жидкости, протекающему по напорным водоводам. **Результаты.** По результатам анализа 22 известных эмпирических зависимостей установлена необходимость уточнения известных формул для определения параметра Дарси применительно к условиям систем капельного орошения садов для всего диапазона факторов влияния: число Рейнольдса – $Re = 2500–500000$; диаметры трубопроводов – $d = 63–500$ мм и скорость потока – $V = 0,4–2,9$ м/с. С учетом установленного состава параметров влияния, посредством использования уравнения неразрывности водного потока, зависимости для определения числа Рейнольдса и авторской зависимости для определения параметра Дарси формула Дарси – Вейсбаха преобразована к виду, позволяющему определить потери напора на участках магистрального и распределительного трубопроводов по значениям расходов в их головном створе Q , их протяженности L , принятому значению внутреннего диаметра трубопровода d и коэффициенту кинетической вязкости потока жидкости ν . **Выводы.** Предложены авторские эмпирические зависимости для расчета параметра Дарси λ , потерь напора в водоводах h_w и диаметров d магистральных и распределительных трубопроводов, и на их основе разработана методика обоснования их параметров.

Ключевые слова: капельное орошение, трубопроводная сеть, гидравлика напорного трения, параметр Дарси, потери напора в трубопроводе, магистральный трубопровод, распределительный трубопровод

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

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-16-34>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Justification of parameters of main and distribution pipelines of the irrigation network of drip irrigation systems

Andrey S. Shtanko¹, Viktor N. Shkura²

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

¹shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

²VNSnshkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

Abstract. Purpose: to establish calculation dependencies and develop a methodology for justifying the parameters of main and distribution pipelines installed as part of the irrigation network of drip irrigation systems. **Materials and methods.** The methodology for justifying the parameters is based on the classical Darcy – Weisbach formula for determining pressure losses in pipelines, known dependencies and the data of the author's study devoted to determining the values of the hydraulic resistance coefficient to the liquid flow through pressure water pipelines. **Results.** Based on the analysis of 22 known empirical dependencies, the necessary to clarify the known formulas for determining Darcy parameter as applied to the drip irrigation systems in gardens for the entire range of influencing factors: Reynolds number $Re = 2500–500000$; pipeline diameters $d = 63–500$ mm and flow velocity $V = 0.4–2.9$ m/s was established. Taking into account the established set of influencing parameters, using the water flow continuity equation, the relationship for determining the Reynolds number, and the author's relationship for determining the Darcy parameter, the Darcy – Weisbach formula is transformed into a form that allows for determining pressure losses in sections of main and distribution pipelines based on the flow rates at their head gauge line Q , their length L , the adopted value of the pipeline internal diameter d , and the coefficient of kinetic viscosity of the liquid flow. **Conclusions.** The author's empirical dependences are proposed for calculating the Darcy parameter λ , pressure losses in water pipelines h_w , and the diameters d of main and distribution pipelines, and a methodology for justification of their parameters is developed based on these dependences.

Keywords: drip irrigation, pipeline network, pressure friction hydraulics, Darcy parameter, pressure losses in a pipeline, main pipeline, distribution pipeline

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

For citation: Shtanko A. S., Shkura V. N. Justification of parameters of main and distribution pipelines of the irrigation network of drip irrigation systems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2):16–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-16-34>.

Введение. Оросительные сети систем капельного орошения представляют собой комплекс последовательно физически взаимосвязанных и гидравлически взаимоувязанных трубопроводов различного функционального назначения. Наиболее высокий уровень в иерархической структуре трубопроводных сетей систем капельного орошения занимают магистральные и питающиеся из них распределительные трубопроводы, обеспечивающие транспортирование и подвод поливной воды и фертигационных растворов к капельно орошаемому участку.

В гидравлическом отношении движение жидкости по магистральным и распределительным трубопроводам рассматривается в виде напорного потока с постоянным расходом вдоль пути.

Теоретические и эмпирические основы гидравлики указанного вида потока в напорных трубопроводах заложены исследованиями Л. Прандля, П. Р. Блазиуса, И. И. Никурадзе, С. Ф. Колбрука, Б. Л. Шифринсона, Ю. С. Оффенгендена, Ф. А. Шевелева, А. Д. Альтшуля, С. П. Ильина и др. и нашли широкое применение при расчетах трубопроводов, используемых в системах водоснабжения.

Широкое применение трубопроводов в гидромелиорации вызвало необходимость разработки рекомендаций и методик обоснования параметров напорных трубопроводов, соответствующих условиям оросительных систем. Известные зависимости и методики расчета, приведенные в публикациях А. А. Федорца и З. Р. Маланчука [1], Г. М. Зюликова и В. П. Шапина [2], О. Е. Ясониди [3], Д. П. Гостищева [4] и др., базируются на использовании классической формулы Дарси – Вейсбаха, предусматривающей определение коэффициента гидравлического сопротивления потока (параметра Дарси – λ), значение которого зависит от геометрических параметров трубопровода (внутренний диаметр, эквивалентная шероховатость) и режима движения жидкости (число Рейнольдса). Общим недостатком известных зависимостей является ограниченность диапазона применения каждой из них, обусловленная условиями выполненных экспериментов при их получении, что отмечено в публикациях Л. И. Высоцкого [5], А. Е. Новикова [6], Т. Актер и др. [7], а также в публикациях авторов статьи [8, 9].

Исследования в этой области продолжаются до настоящего времени. Так, А. К. Семерджяном и др. [10] предложено аналитическое решение рассматриваемой задачи на базе уравнений Л. Эйлера и неразрывности потока, возможность использования которого затруднено отсутствием реализованного в качестве программы для ЭВМ программного продукта.

Ж. Х. Ишановым [11] предложено решение задачи по расчету скорости потока в различных сечениях трубопровода, но не предусмотрено определение потерь напора по их длине.

Указанные обстоятельства предопределили целесообразность проведения настоящего исследования, целью которого является установление расчетных зависимостей и разработка методики обоснования и определения параметров магистральных и распределительных трубопроводов, устраиваемых в составе оросительной сети систем капельного орошения, для трубопроводов с диаметрами от 50 до 500 мм и параметром Рейнольдса, изменяющимся в диапазоне от 2500 до 500000.

Материалы и методы. Теоретическую основу разработки составила зависимость Дарси – Вейсбаха для определения потерь напора водного потока, протекающего по трубам в напорном режиме. В процессе исследований были проведены анализ и сопоставление результатов расчета коэффициента сопротивления Дарси по известным зависимостям для диапазона числа Рейнольдса от 2500 до 500000, характерного для магистрального и распределительных трубопроводов систем капельного орошения. Экспериментальные исследования, посвященные определению коэффициента сопротивления, проводились на модели трубопровода с использованием пластмассового трубопровода (ПНД) с наружным диаметром $d_n = 0,063$ м и внутренним диаметром $d_b = 0,0576$ м. Общая протяженность трубопровода $L_{общ} = 125$ м, из них рабочая его часть (с фиксацией давлений в трубе) составляла 120 м. Вода в трубопровод подавалась насосом под давлением $P = 2,5–3,0$ атм. Трубопровод оборудован задвижкой и двумя манометрами, размещенными в начальном и конечном створах трубопровода. Расход водного потока, протекающего по трубопроводу, замерялся объемным способом с фиксацией продолжительности заполнения мерной емкости. Температура воды при проведении опытов составляла $20,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты и обсуждение. Основной задачей проектирования магистральных и распределительных трубопроводов оросительной сети систем капельного орошения является установление диаметров трубопроводов, обеспечивающих приемлемые потери напора при транспортировании заданных расходов жидкости в определенных топографических и технологических условиях их функционирования. В качестве исходных данных для обоснования параметров указанных трубопроводов рассматриваются: плановое и высотное расположение трассы магистралей и распределителей на местности, схемы расположения отводов воды в трубопроводы более низкого иерархического порядка, расходные и линейные параметры расчетных участков, характеризующихся неизменным расходом потока.

В практике проектирования и гидравлического расчета магистральных и распределительных трубопроводов в системах капельного орошения используется классическая зависимость Дарси – Вейсбаха [1] в виде, м:

$$h_{л/п} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где $h_{л/п}$ – линейные потери напора в трубопроводе, м;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления водного потока, протекающего по трубопроводу, функционирующему в напорном режиме;

L – длина расчетного участка трубопровода, м;

d – внутренний диаметр для расчетной длины трубы, м;

V – средняя по живому сечению скорость водного потока, м/с;

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

Определяющей характеристикой уравнения (1) является экспериментально устанавливаемая величина параметра Дарси – λ . Значение коэффициента гидравлического трения (гидравлического сопротивления протекающему по водоводу потоку жидкости) зависит: от размеров, формы и шероховатости поверхности внутренней полости трубопровода; характеристик и режима течения водного потока; физических свойств жидкости.

Функциональная связь, определяющая величину параметра Дарси в зависимости от вышеуказанных факторов влияния, имеет вид:

$$\lambda = f_1(V; d; \nu; \Delta_s) \text{ или} \quad (2)$$

$$\lambda = f_2(\text{Re}; \Delta_s / d), \quad (3)$$

где V – средняя по живому сечению скорость водного потока, м/с;

d – диаметр внутренней полости трубопровода, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с;

Δ_s – величина эффективной шероховатости поверхности трубы, м;

$\text{Re} = V \cdot d / \nu$ – число Рейнольдса для потока жидкости.

Установлению зависимостей для определения значений λ посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных специалистов. Примеры ряда известных зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Примеры расчетных зависимостей для определения параметра гидравлического сопротивления – λ

Table 1 – Examples of calculation dependencies for determining the hydraulic resistance parameter λ

Автор зависимости	Расчетная зависимость
1	2
Б. Л. Шифринсон ¹	$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25} \quad (4)$
Л. Прандль ¹	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{d}{\Delta_s} + 1,74 \quad (5)$
Н. З. Френкель ²	$\lambda = \frac{2,7}{\text{Re}^{0,53}} \quad (6)$
П. Р. Блазиус ³	$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (7)$
С. Ф. Колбрук ¹	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,5}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) + \frac{\Delta_s}{3,7d} \quad (8)$

¹Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. 5-е изд. М.: Энергия, 1974. 313 с.

²Степанов П. М., Овчаренко И. Х., Скобельцин Ю. А. Справочник по гидравлике для мелиораторов. М.: Колос, 1984. 207 с.

³Справочник по гидравлике / В. А. Большаков [и др.]; под ред. В. А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Высш. шк., 1984. 343 с.

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2
А. Д. Альтшуль ¹	$\lambda = \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \cdot 0,11 \quad (9)$
Прандль – Никурадзе ¹	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \text{Re} \sqrt{\lambda} - 0,8 \quad (10)$
Ф. А. Шевелев ³	$\lambda = \frac{0,25}{\text{Re}^{0,226}} \quad (11)$
В. П. Ермоленко ²	$\lambda = 0,152 / \left(\frac{r}{\Delta_3} \right)^{0,34}, \quad (12)$ где r – внутренний радиус трубопровода
З. Р. Маланчук ²	$\lambda = \frac{0,2017}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (13)$
	$\lambda = \frac{(0,29 - 0,000236 \cdot d)}{\text{Re}^{0,22}} \quad (14)$
Г. М. Зюликов [2]	$\lambda = \frac{66,5}{\text{Re}^{0,647}}, \quad (15)$
	$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{0,037}{d} + \frac{100}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (16)$
А. С. Цейтлин ²	$\lambda = \left(0,95 + \frac{0,15}{V} \right)^{0,19} \cdot 0,11 / d^{0,25} \quad (17)$
А. И. Мурашко ¹	$\lambda = \frac{0,318}{d^{0,09} \cdot \text{Re}^{0,25}}, \quad (18)$
	$\lambda = \frac{0,262}{\text{Re}^{0,226}} \quad (19)$
Г. И. Карпий ²	$\lambda = \frac{0,331}{\text{Re}^{0,25}} \quad (20)$
А. А. Федорец [1]	$\lambda = \frac{3,148}{d^{0,09} \cdot \text{Re}^{0,45}}, \quad (21)$
	$\lambda = \frac{2,594}{\text{Re}^{0,426}} \quad (22)$
Б. Г. Штепа ⁴	$\lambda = \frac{0,2017}{\text{Re}^{0,2}} \quad (23)$
П. М. Степанов ²	$\lambda = \frac{0,36 \cdot d^{0,01}}{\text{Re}^{0,25}} \quad (24)$
О. Е. Ясониди, Д. П. Гостищев [4]	$\lambda = \frac{2,111}{\text{Re}^{0,4}} \quad (25)$

⁴Механизация полива: справочник / Б. Г. Штепа [и др.]. М.: Агропромиздат, 1990.
335 с

Продолжение таблицы 1
 Table 1 continued

1	2
М. А. Вольнов, З. Р. Маланчук и др. ⁵	$\lambda = \frac{0,302}{\text{Re}^{0,226}} \quad (26)$
И. И. Никурадзе [5]	$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (27)$
О. Е. Ясониди [3]	$\lambda = \frac{1,363}{\text{Re}^{0,3444}} \quad (28)$
Колбрук – Уайт [5]	$\lambda_2 = 1,3225 / \left[\ln \left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \right]^2 \quad (29)$
В. J. McKoen, A. S. Smits, M. V. Zagarola [5]	$\lambda_1 = \left[0,839 \cdot \ln(\text{Re}_\alpha \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,537 \right]^2, \quad (30)$
	$\lambda_2 = \left[0,813 \cdot \lg(\text{Re}_d \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,241 - \left(\frac{233}{\text{Re}_d \cdot \sqrt{\lambda}} \right)^{0,9} \right]^{-2} \quad (31)$
А. Е. Новиков [6]	$\lambda = \frac{0,364}{\text{Re}^{0,25}} \quad (32)$

По приведенным в таблице 1 зависимостям отмечено следующее.

1 Зависимости отличаются по структуре регрессионных связей между искомой величиной λ и параметрами влияния. Основная часть формул имеет вид $\lambda = a / \text{Re}^b$. Имеются описывающие искомую величину λ зависимости в виде $\lambda = f(\text{Re}, d)$, $\lambda = f(\text{Re}, \Delta_3 / d)$, $\lambda = f(\Delta_3 / d)$ и др.

2 Зависимости отличаются различными диапазонами применимости, обусловленными разными условиями проведения экспериментов и границами изменения факторов влияния (расходно-скоростных характеристик, параметров трубопроводов и др.) при их получении, и характеризуются различиями в абсолютных значениях коэффициента Дарси.

3 В большинстве доступных пользователю описаний зависимостей отсутствуют сведения об условиях их применения, что создает проблему их выбора при выполнении гидравлических расчетов.

Учитывая многообразие расчетных зависимостей и отсутствие четко

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.

сформулированных условий применения некоторых из них, выполнили расчеты с целью определения значений λ для наиболее типичных условий устройства и функционирования трубопроводной сети систем капельного орошения при значениях числа Re от 2500 до 500000 для диаметров труб $d = 63$ мм и Δ_s от 0,05 до 0,10 мм. Результаты расчета значений параметра Дарси по 22 зависимостям приведены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2 – Расчетные значения параметра Дарси (λ), определенные по известным зависимостям

Table 2 – Calculated values of the Darcy parameter (λ), determined from known dependencies

Разработчик или источник	Значение λ для принятых значений Re					
	2500	10000	50000	100000	250000	500000
1) Пособие к СНиП 2.06.03-85 ⁵	0,05154	0,03767	0,02618	0,02240	0,01820	0,01556
2) З. Р. Маланчук (1) ²	0,0422	0,0320	0,0232	0,02020	0,01680	0,0146
3) З. Р. Маланчук (2) ²	0,0494	0,0364	0,0234	0,01967	0,01565	0,01316
4) Б. Г. Штепа ⁴	0,04218	0,0320	0,0232	0,0202	0,0168	0,01462
5) П. Р. Блазиус ³	0,04483	0,0317	0,0212	0,0178	0,0142	0,0119
6) Ф. А. Шевелев ³	0,04266	0,0312	0,0217	0,0185	0,0151	0,0129
7) А. Д. Альтшуль ¹	0,04502	0,03255	0,02390	0,02180	0,0202	0,0150
8) Прандль – Никурадзе ¹	0,0460	0,0310	0,0216	0,0180	0,0150	0,0130
9) И. И. Никурадзе [5]	0,0378	0,0281	0,0202	0,0176	0,0148	0,0131
10) А. И. Мурашко ¹	0,0447	0,0327	0,0227	0,0194	0,0158	0,0135
11) А. И. Мурашко ¹	0,0581	0,0411	0,0275	0,0231	0,0184	0,0154
12) Г. М. Зюликов [2]	0,0499	0,0321	0,0227	0,0201	0,0180	0,0170
13) Г. И. Карпий ²	0,0468	0,0331	0,0221	0,0186	0,0148	0,0124
14) Д. П. Гостищев, О. Е. Ясониди [4]	–	–	0,0278	0,0211	0,0146	0,0111
15) О. Е. Ясониди [3]	–	–	–	–	0,0189	0,01485
16) С. Ф. Колбрук ¹	0,0460	0,0308	0,0210	0,0180	0,0150	0,0131
17) Колбрук – Уайт [5]	0,0400	0,0307	0,0208	0,0180	0,0150	0,0131
18) В. J. McKoen, A. S. Smits, M. V. Zagarola [5]	0,0448	0,0305	0,0208	0,0181	0,0150	0,0133
19) П. М. Степанов ²	0,0495	0,0350	0,0234	0,01967	0,01565	0,01316
20) А. А. Федорец (1) [1]	–	–	0,0313	0,0229	0,01520	0,0111
21) А. А. Федорец (2) [1]	–	–	0,0258	0,0192	0,0130	0,0100
22) А. Е. Новиков [6]	0,0513	0,0364	0,0243	0,0205	0,0163	0,0137
Среднее	0,0462	0,0331	0,0235	0,0198	0,0161	0,0136
Примечания 1 Прочерки в пп. 14, 15, 20 и 21 означают неприемлемость расчетной зависимости для соответствующего значения числа Рейнольдса. 2 При расчете средних значений параметра Дарси ячейки с прочерками не учитывались.						

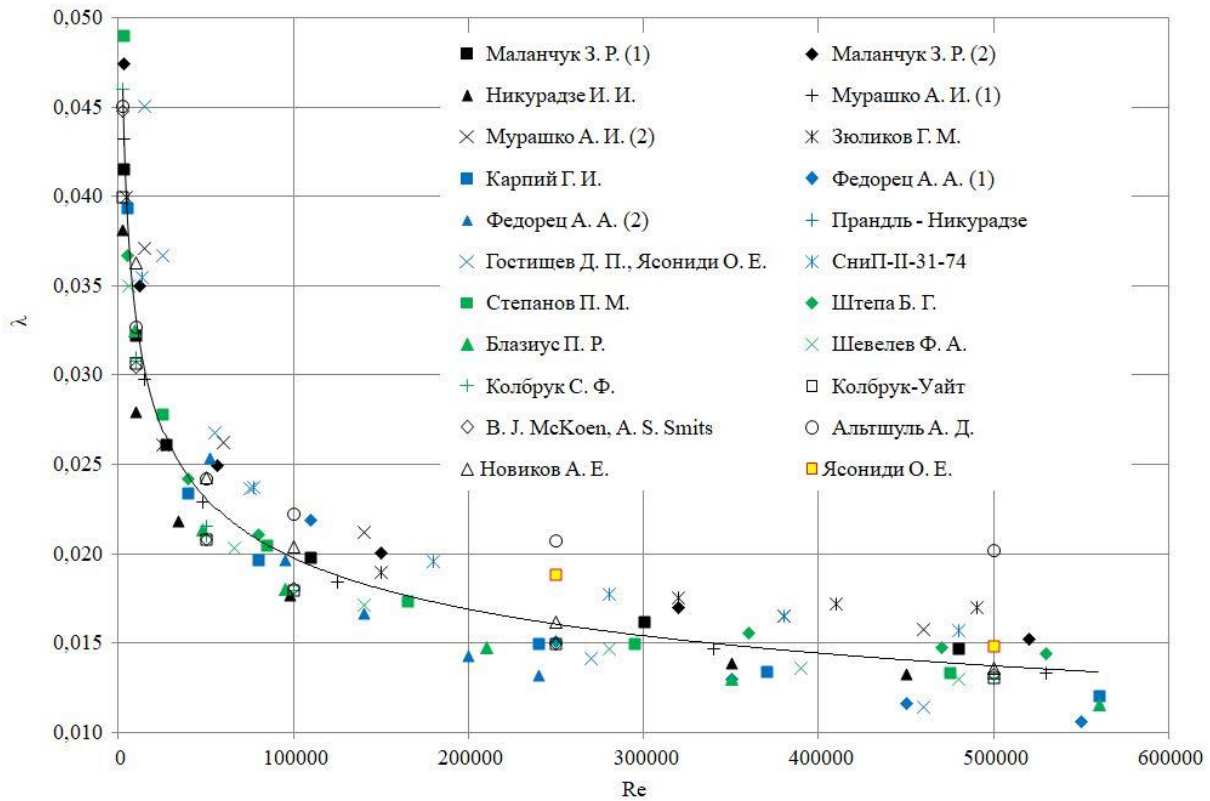


Рисунок 1 – Данные и график функциональной связи $\lambda = f(\text{Re})$

Figure 1 – Data and functional relationship graph $\lambda = f(\text{Re})$

Анализ приведенных в таблице 2 и на рисунке 1 данных о рассчитанных значениях параметра Дарси позволяет отметить нижеследующее.

1 Значения λ , рассчитанные по известным зависимостям, характеризуются системным уменьшением их величины с увеличением числа Рейнольдса, определенного по средней скорости и диаметру трубопровода.

2 Численные значения параметра λ характеризуются близостью их величин в одних расчетных условиях при использовании отдельных расчетных зависимостей и значительными отличиями в других. Отличия между максимальными и минимальными расчетными значениями параметра λ при одинаковых исходных данных составляют 30–40 %, а относительные отклонения от средних значений достигают 26–28 %.

Указанные обстоятельства предопределили постановку экспериментов по определению значения параметра Дарси для полимерного трубопровода (ПНД), массово используемого в системах капельного орошения.

Условия эксперимента, зафиксированные и рассчитанные значения исходных данных и определяемых параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Условия проведения и результаты опытов по определению значений коэффициента Дарси

Table 3 – Experimental conditions and results for determining the Darcy coefficient values

№ измерения	Расход Q , м ³ /с	Скорость V , м/с	Число Рейнольдса ¹ Re	Перепад давлений ΔP , м	Коэффициент Дарси ² λ
1	0,00297	1,14	65775	2,86	0,0207
2	0,00334	1,28	73994	3,52	0,0202
3	0,00371	1,43	82191	4,59	0,0211
4	0,00689	2,65	152640	12,50	0,0168
5	0,00444	1,71	98462	6,38	0,0205
6	0,00210	0,808	46523	1,69	0,0244
7	0,00102	0,392	22597	0,45	0,0276

Примечания
 1 Рассчитано при $\nu = 0,000001$ м²/с.
 2 Рассчитано по формуле: $\lambda = \frac{\Delta P \cdot d_v \cdot 2g}{L \cdot V^2}$. (33)

Значения коэффициента гидравлического сопротивления λ и функциональные связи $\lambda = f_1(Re)$ аппроксимируются зависимостями:

$$\lambda = 0,275 / Re^{0,23}, \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{0,263}{Re^{0,23}} \cdot \left[1,0 + \left(\frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,4} \right]. \quad (35)$$

Формула (34) используется в расчетах новых труб с нормативными значениями Δ_s и d . Формула (35) учитывает не только величину числа Рейнольдса, но и значение соотношения Δ_s/d , которое может изменяться в процессе эксплуатации трубопровода. Вид эмпирических зависимостей (34) и (35) и положенные в их основу авторские опытные и средние по таблице 1 значения параметра Дарси λ для широкого спектра значений числа Рейнольдса Re проиллюстрированы на рисунке 2.

Апробация зависимостей (34) и (35), проведенная для широкого спектра условий ($Re = 5000-500000$, $\Delta_s/d = 0,001-0,0001$), показала ее

приемлемость для ведения расчетов трубопроводов оросительной сети систем капельного орошения с погрешностью, не превышающей 5–6 %.

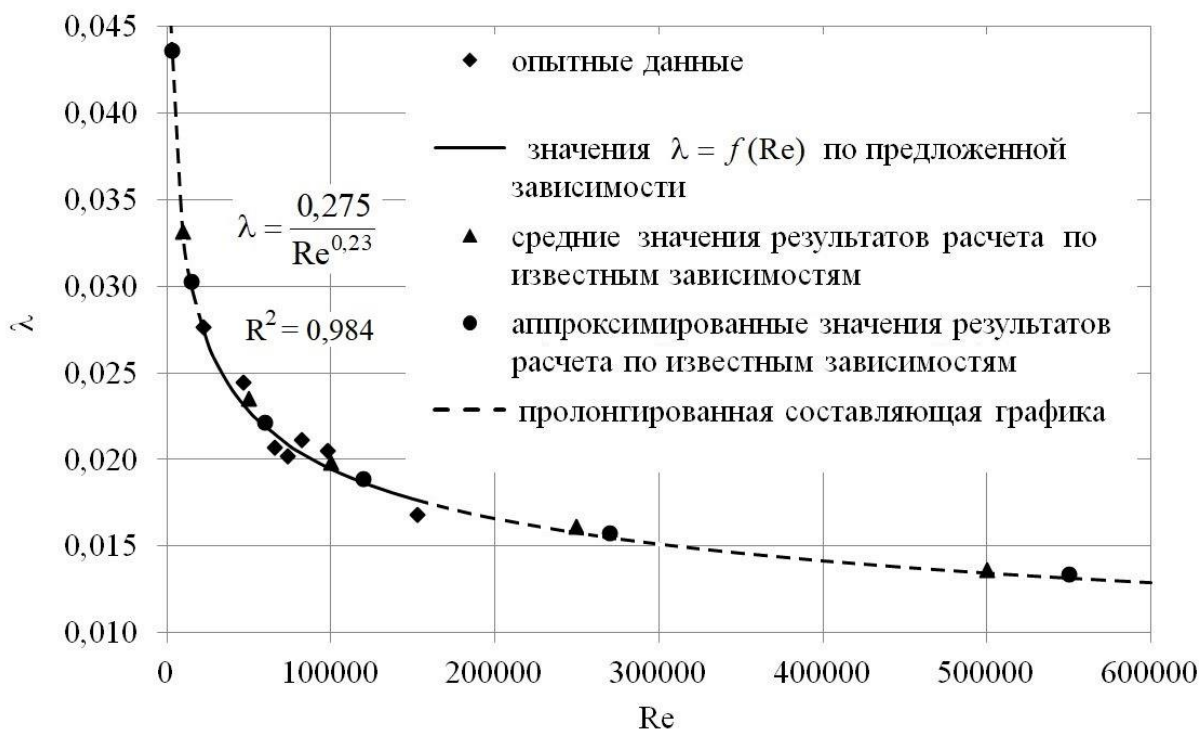


Рисунок 2 – Опытные данные и график зависимости $\lambda = f(Re)$

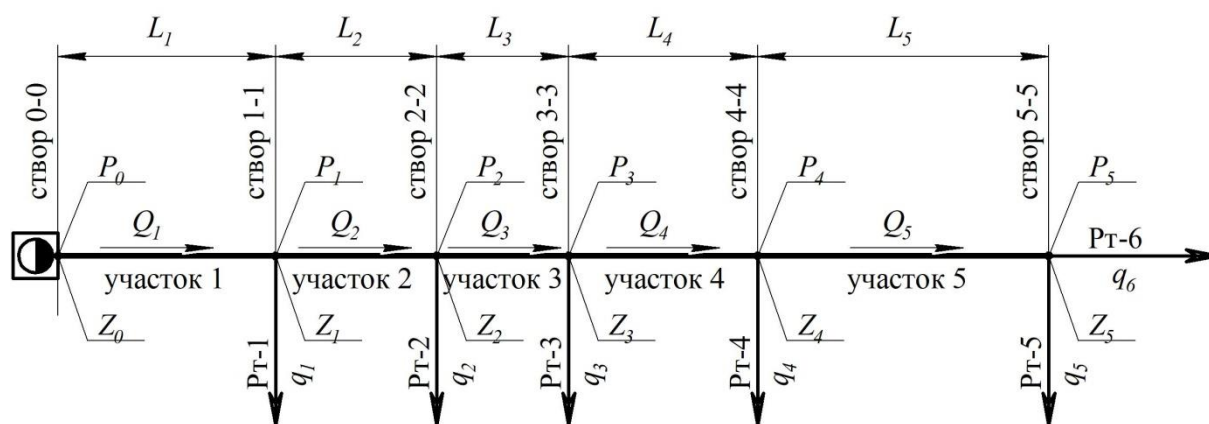
Figure 2 – Experimental data and dependence graph $\lambda = f(Re)$

Основными расчетными параметрами магистральных и распределительных трубопроводов являются: потери напора в пределах расчетного участка трубопровода $(h_w)_i$; диаметр трубопровода на расчетном участке магистрального или распределительного трубопровода d_i ; давление в начальном и конечном створах расчетного участка трубопровода P_i ; перепад напора на участке $\Delta H_i = \Delta Z_i - (h_w)_i$, где ΔZ_i – геодезический перепад отметок поверхности земли по трассе расчетного участка.

Исходными данными для расчета являются: 1) протяженность расчетного участка трубопровода L_i , м; 2) расход поливной воды на расчетном участке трубопровода Q_i , м³/с; 3) коэффициент кинематической вязкости транспортируемой по трубопроводу поливной воды ν , м²/с.

При определении исходных данных для гидравлического расчета ма-

гистрального трубопровода предварительно разрабатывается расчетная схема, пример которой приведен на рисунке 3.



Участок 1 – участок 5 – расчетные участки магистрального трубопровода;
 $P_0 - P_5$ – давление в створах; $Z_0 - Z_5$ – высотные отметки оси трубопровода;
 $Q_1 - Q_5$ – расход на расчетном участке; $L_1 - L_5$ – протяженность расчетных участков; $q_1 - q_6$ – расходы воды, подаваемые в распределительные трубопроводы

Section 1 – section 5 – gage sections of the main pipeline;

$P_0 - P_5$ – pressure at gauge lines; $Z_0 - Z_5$ – pipeline axis elevations;

$Q_1 - Q_5$ – flow rate at the gage section; $L_1 - L_5$ – gage sections length;

$q_1 - q_6$ – water flow rates supplied to the distribution pipelines

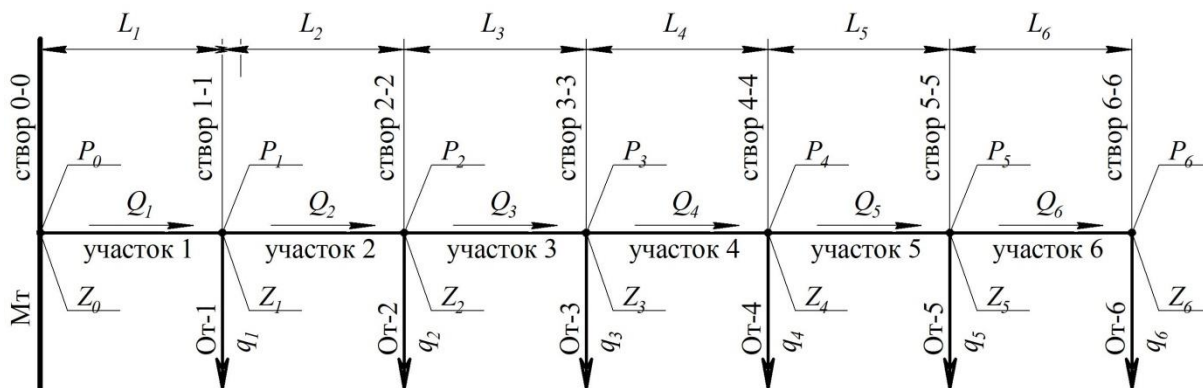
Рисунок 3 – Расчетная схема для гидравлического расчета магистрального трубопровода

Figure 3 – Calculation diagram for hydraulic calculation of the main pipeline

В соответствии со схемой устанавливаются расчетные участки трубопровода, в качестве которых рассматриваются участки с одинаковыми расходами протекающей по ним жидкости, ограниченные двумя водоводами, а также начальным и конечным створом и водоводом. Протяженность каждого расчетного участка L_i , м, устанавливают по вычерченной в масштабе компоновочной схеме. Расчетные расходы по каждому из участков Q_i , м³/с, определяют суммированием расходов питаемых расчетным участком трубопроводов. Например, в соответствии со схемой на рисунке 3 расчетные расходы по каждому из участков составят: $Q_5 = q_5 + q_6$; $Q_4 = q_4 + q_5 + q_6$; $Q_3 = q_3 + q_4 + q_5 + q_6$; $Q_2 = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$; $Q_1 = q_1 + Q_2$.

Исходные данные для гидравлического расчета распределительного

трубопровода устанавливаются в соответствии с планом садового насаждения по разрабатываемой расчетной схеме, пример которой приведен на рисунке 4.



Участок 1 – участок 6 – расчетные участки распределительного трубопровода;
 $P_0 - P_6$ – давление в створах; $Z_0 - Z_6$ – высотные отметки оси трубопровода;
 $Q_1 - Q_6$ – расход на расчетном участке; $L_1 - L_6$ – протяженность расчетных участков; $q_1 - q_6$ – расходы воды, подаваемые в оросительные трубопроводы

Section 1 – section 6 – distribution pipeline gage sections;
 $P_0 - P_6$ – pressure at gage lines; $Z_0 - Z_6$ – pipeline axis elevations;
 $Q_1 - Q_6$ – gage section flow rate; $L_1 - L_6$ – gage sections length;
 $q_1 - q_6$ – water flow rates supplied to the irrigation pipelines

Рисунок 4 – Расчетная схема для гидравлического расчета распределительного трубопровода
Figure 4 – Calculation diagram for hydraulic calculation of the distribution pipeline

Исходные данные для гидравлического расчета распределительного трубопровода устанавливаются по аналогии с вышеприведенным описанием их определения для магистрального трубопровода. Расчетные участки и их протяженность L_i , м, устанавливаются по условию неизменности расхода воды на протяжении участка. При этом расходы на участке определяются с учетом расходов всех питаемых оросительных трубопроводов. Например, в соответствии со схемой по рисунку 4, расчетные значения расходов на участках распределительного трубопровода определяются по соотношению: $Q_6 = q_6$; $Q_5 = q_5 + q_6$; $Q_4 = q_4 + q_5 + q_6$; $Q_3 = q_3 + q_4 + q_5 + q_6$; $Q_2 = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$; $Q_1 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$.

Гидравлический расчет по каждому из расчетных участков магистрального и распределительного трубопроводов производится с использованием зависимостей, м:

$$(h_w)_i = 0,0215 \cdot \frac{Q_i^{1,77} \cdot L_i \cdot v^{0,23}}{d_i^{4,77}} \cdot k_{м/п}, \quad (36)$$

$$d_i = 0,4588 \cdot \frac{Q_i^{0,359} \cdot L_i^{0,2029} \cdot v^{0,0467}}{(h_w)_i^{0,2029}}, \quad (37)$$

где $(h_w)_i$ – общие потери напора на расчетном участке трубопровода, м;

Q_i – расход на расчетном участке трубопровода, м³/с;

L_i – протяженность расчетного участка трубопровода, м;

v – кинематический коэффициент вязкости транспортируемой по трубопроводу поливной воды, м²/с;

d_i – внутренний диаметр на расчетном участке трубопровода, м;

$k_{м/п}$ – коэффициент, учитывающий местные потери напора на участке магистрального или распределительного трубопровода, $k_{м/п} = 1,02–1,03$.

Значения $k_{м/п}$ приняты по результатам расчета местных сопротивлений в виде сварных швов для наиболее сложных условий протекания потока по распределительным трубопроводам.

Зависимости (36) и (37) получены в результате преобразования формулы (1) для условий расчета участков магистрального и распределительного трубопроводов, выполняемого с учетом эмпирической зависимости (34), формулы для определения числа Рейнольдса и уравнения неразрывности.

Обоснование параметров трубопроводов осуществляется по алгоритму, приведенному на рисунке 5.

Обязательным условием является использование в расчетах сортаментных размеров индустриально изготавливаемых пластмассовых труб при соблюдении ограничения по средней скорости протекания потока жидкости $V \leq 3,0$ м/с и соотношения $d_i \leq 1,535\sqrt{Q_i}$.

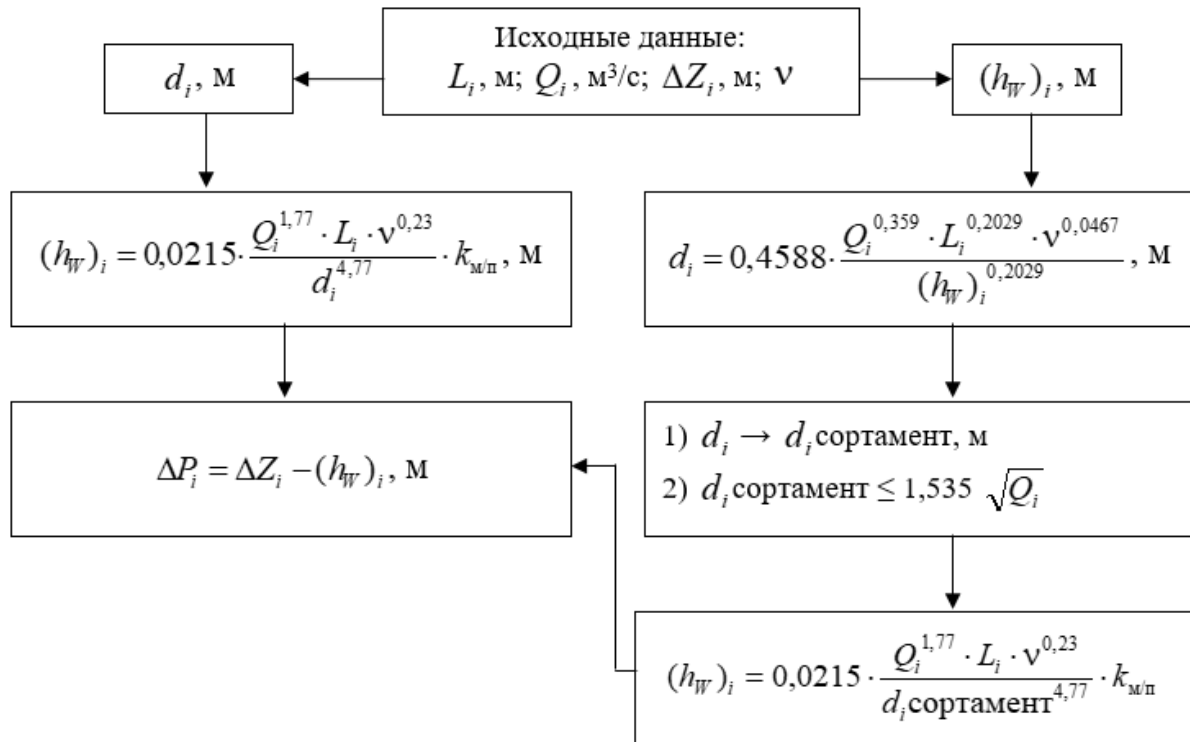


Рисунок 5 – Блок-схема обоснования параметров магистрального и распределительного трубопроводов

Figure 5 – Flowchart for substantiating the parameters of main and distribution pipelines

Выводы

1 В результате сопоставления 22 известных зависимостей для определения коэффициента гидравлического сопротивления потока жидкости, протекающего по напорным трубопроводам, установлено наличие отклонений в его значениях от среднего в диапазоне 20–30 %, что при необоснованном использовании предопределяет возможность погрешности в результатах гидравлического расчета параметров магистральных и распределительных трубопроводов.

2 На основе обобщения известных зависимостей и данных авторских исследований получены две эмпирические зависимости для определения параметра Дарси, одна из которых используется в расчетах новых труб с нормативными значениями эффективной шероховатости поверхности трубы Δ_s и внутреннего диаметра трубы d , другая учитывает не только величину числа Рейнольдса, но и значение соотношения Δ_s/d , которое может

изменяться в процессе эксплуатации трубопровода. Апробация зависимостей показала их приемлемость для ведения расчетов трубопроводов оросительной сети систем капельного орошения с погрешностью, не превышающей 5–6 %.

3 Предложены зависимости для расчета потерь напора и диаметров магистральных и распределительных трубопроводов, базирующиеся на формуле Дарси – Вейсбаха и учитывающие авторскую эмпирическую зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления, позволяющие устанавливать значения указанных параметров при заданных значениях расходов, протяженности и коэффициента кинематической вязкости поливной воды, а также фертигационных и промывных растворов.

4 С использованием результатов исследования разработана методика обоснования параметров магистральных и распределительных трубопроводов, устраиваемых в составе оросительной сети систем капельного орошения, с диаметрами труб от 50 до 500 мм и параметром Рейнольдса в диапазоне от 2500 до 500000.

Список источников

1. Федорев А. А., Маланчук З. Р. Технические указания по гидравлическому расчету систем капельного орошения. Кишинев, 1981. 456 с.
2. Зюликов Г. М., Шапина В. Г. Применение алюминиевых трубопроводов для закрытых оросительных систем // Современные оросительные системы и пути их совершенствования. 1978. Вып. 2. С. 98–105.
3. Ясониди О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с. EDN: QLCBEP.
4. Ясониди Е. О., Ясониди О. Е., Гостищев Д. П. Гидравлические исследования поливных трубопроводов с капельницами // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 1. С. 33–39. EDN: YQRJKH.
5. Высоцкий Л. И. Рекомендации по использованию формул для коэффициента Дарси при расчете распределения осредненных скоростей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2014. № 4(16). С. 204–212. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=761> (дата обращения: 24.05.2026). EDN: RCWATB.
6. 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.
7. Evaluation of hydraulic performance of a small-scale drip irrigation system / T. Akter, M. H. Rahman, S. Niloy, 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. Шкура В. Н., Масный Р. С., Штанько А. С. Системы капельного орошения садов: науч.-практ. изд. М.: Росинформагротех, 2023. 300 с.

9. Штанько А. С., Шкура В. Н. Обоснование параметров и разработка компоновочных решений поливной сети систем капельного орошения садов // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 2. С. 71–93. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-71-93. EDN: VZOZVI.

10. 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.

11. 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.

References

1. Fedorets A.A., Malanchuk Z.R., 1981. *Tekhnicheskie ukazaniya po gidravlicheskomu raschetu sistem kapel'nogo orosheniya* [Technical Guidelines for Hydraulic Calculation of Drip Irrigation Systems]. Chisinau, 456 p. (In Russian).

2. Zyulikov G.M., Shapina V.G., 1978. *Primenenie alyuminievykh truboprovodov dlya zakrytykh orositel'nykh sistem* [Use of aluminum pipelines for closed irrigation systems]. *Sovremennye orositel'nye sistemy i puti ikh sovershenstvovaniya* [Modern Irrigation Systems and Ways to Improve Them], iss. 2, pp. 98-105. (In Russian).

3. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie* [Drip Irrigation]. Novochoerkassk, Lick Publ., 322 p., EDN: QLCBEP. (In Russian).

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

5. Vysotsky L.I., 2014. [Guidance for the use of formulas for the Darcy coefficient calculating the distribution of average velocities]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 4(16), pp. 204-212, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=761> (accessed 24.05.2026), EDN: RCWATB. (In Russian).

6. Novikov A.E., Lamskova M.I., 2014. *Issledovanie poter' napora i ravnomernosti raskhoda zhidkostey v kapel'nykh truboprovodakh* [Study of pressure losses and uniformity of liquid flow 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).

7. Akter T., Rahman M.H., Niloy S., 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. Shkura V.N., Masny R.S., Shtanko A.S., 2023. *Sistemy kapel'nogo orosheniya sadov: nauchno-prakt. izdanie* [Drip Irrigation Systems for Gardens: Scientific and Practical Publication]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 300 p. (In Russian).

9. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2025. *Obosnovanie parametrov i razrabotka komponovochnykh resheniy polivnoy seti sistem kapel'nogo orosheniya sadov* [Justification of parameters and development of layout solutions for the irrigation network of drip irrigation systems for gardens]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 15, no. 2, pp. 71-93, DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-71-93, EDN: VZOZVI. (In Russian).

10. 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*

provodakh sistem kapel'nogo orosheniya [Mathematical modeling of fluid motion in irrigation and district 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).

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

Информация об авторах

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;

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.

Information about the authors

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

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

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 27.01.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 22.06.2026.

The article was submitted 27.01.2026; approved after reviewing 23.04.2026; accepted for publication 22.06.2026.