

Научная статья

Original article

УДК 631.347.3.012.3.001.2

doi: https://doi.org/10.55186/25880209_2026_10_4_35

edn: EBLSNX

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
СТАЦИОНАРНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ СИСТЕМ
METHODOLOGY FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS OF
STATIONARY SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS**



Рязанцев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник отдела систем орошения дождеванием, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9829-8196>, ryazantsev.41@mail.ru

Антипов Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела систем орошения дождеванием, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4374-163X>, antipov.aleksei2010@yandex.ru

Евсеев Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем, теории и методики образовательных процессов ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет» (140411,

Россия, г. Коломна, ул. Зеленая, д. 30) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-2661>, evseev.evgeniy.1995@mail.ru

Малько Игорь Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела техники и технологий микроорошения, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Anatoly I. Ryazantsev, Doctor of technical sciences, professor, honored scientist of the Russian Federation, chief researcher at the department of sprinkler irrigation systems, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga" (38, Raduzhny settlement, Kolomna urban district, Kolomna, 140483 Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9829-8196>, ryazantsev.41@mail.ru

Alexey Olegovich Antipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Sprinkler Irrigation Systems Department, Raduga All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply (38 Raduzhny Settlement, Kolomna, 140483, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4374-163X>, antipov.aleksei2010@yandex.ru

Evgeny Yu. Evseev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Systems, Theory and Methodology of Educational Processes at the State Social and Humanitarian University (30, Zelenaya Street, Kolomna, 140411 Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-2661>, evseev.evgeniy.1995@mail.ru

Igor Valerievich. Malko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Department of Micro-Irrigation Engineering and Technology, Raduga All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply (38 Raduzhny Settlement, Kolomna, 140483, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ классической методики определения оптимальных параметров стационарных дождевальных систем (ВИСХОМ, 1963) и современных подходов к их проектированию. Рассмотрены аналитические методы минимизации суммарных годовых затрат, включающих амортизационные отчисления по трубопроводной сети и расходы насосной станции. Систематизированы современные методики: гидравлическое моделирование в EPANET и FAST-GPU, методы дискретной оптимизации, системы переменной нормы орошения (VRI), IoT-датчики и цифровые двойники. Предложена усовершенствованная шестиэтапная методика проектирования СДС.

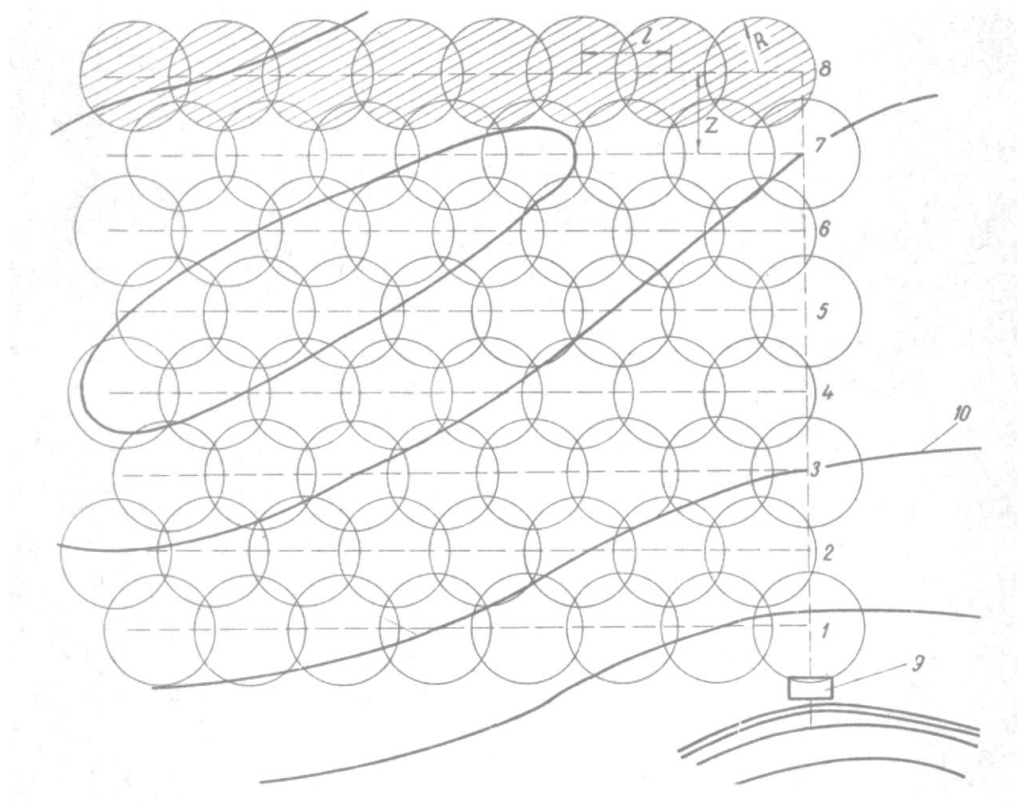
Abstract. The article provides a comparative analysis of the classical methodology for determining the optimal parameters of stationary sprinkler systems (VISKHOM, 1963) and modern approaches to their design. Analytical methods for minimizing total annual costs, including depreciation charges on the pipeline network and pumping station costs, are considered. Modern methods are systematized: hydraulic modeling in EPANET and FAST-GPU, discrete optimization methods, variable irrigation rate (VRI) systems, IoT sensors and digital twins. An improved six-stage VTS design methodology is proposed.

Ключевые слова: стационарная дождевальная система, оптимизация параметров, гидравлический расчёт, EPANET, IoT-орошение, переменная норма орошения, цифровой двойник

Keywords: stationary sprinkler irrigation system, parameter optimization, hydraulic calculation, EPANET, IoT-based irrigation, variable rate irrigation, digital twin

Введение. Стационарные дождевальные системы (СДС) занимают особое место среди оросительной техники благодаря высокой производительности труда и возможности полной автоматизации водораспределения. Конструктивно СДС включает насосную станцию, магистральный трубопровод и разветвлённую сеть оросительных трубопроводов с

гидрантами, на которых монтируются дальнеструйные дождевальные аппараты (рисунок 1) [4].

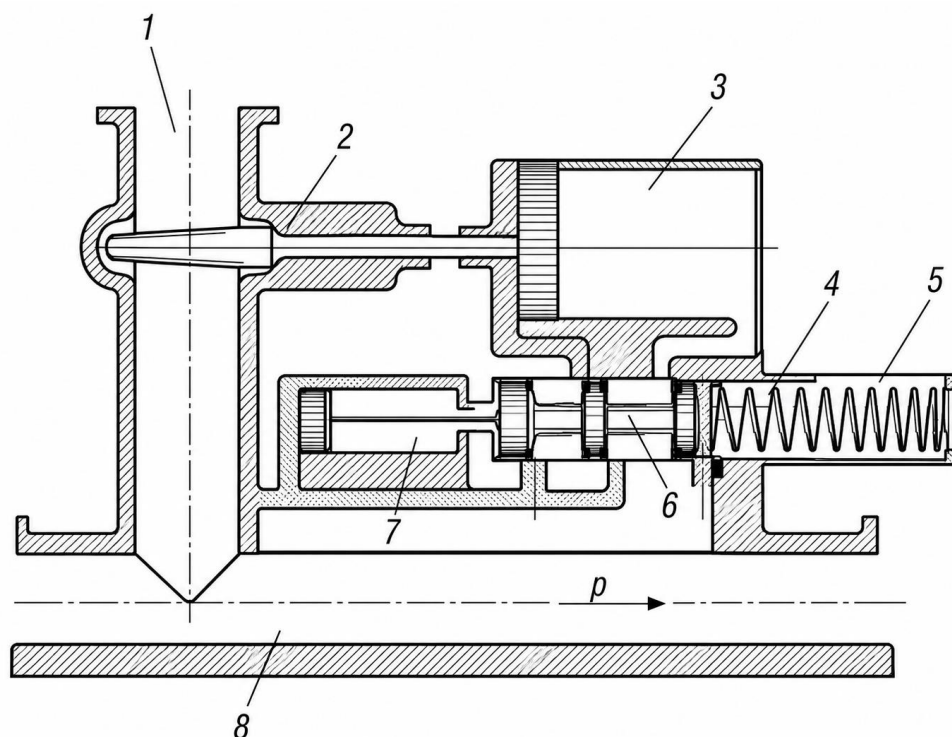


1...8 – задвижки; 9 – насосная станция;

Рисунок 1 – Схема стационарной дождевальной установки

Первая систематизированная отечественная методика разработана в 1963 г. Б. М. Лебедевым (ВИСХОМ) и основана на минимизации суммарных годовых затрат – амортизационных отчислений по трубопроводной сети и расходов на электроэнергию насосной станции [4]. Целью настоящей статьи является систематизация классического аналитического подхода и его сопоставление с современными методами оптимизации параметров СДС.

Насосная станция подаёт воду в магистральный трубопровод, от которого на равных расстояниях отведены оросительные трубопроводы. Одновременно работает только один оросительный трубопровод. Переключение между трубопроводами осуществляется автоматически с помощью задвижек, управляемых по давлению (рисунок 2), настроенных на различные диапазоны [4].



1 – отвод; 2 – задвижка; 3 – сервомотор; 4 – пружина; 5 – колпачок; 6 – золотник; 7 – вспомогательный цилиндр; 8 – трубопровод

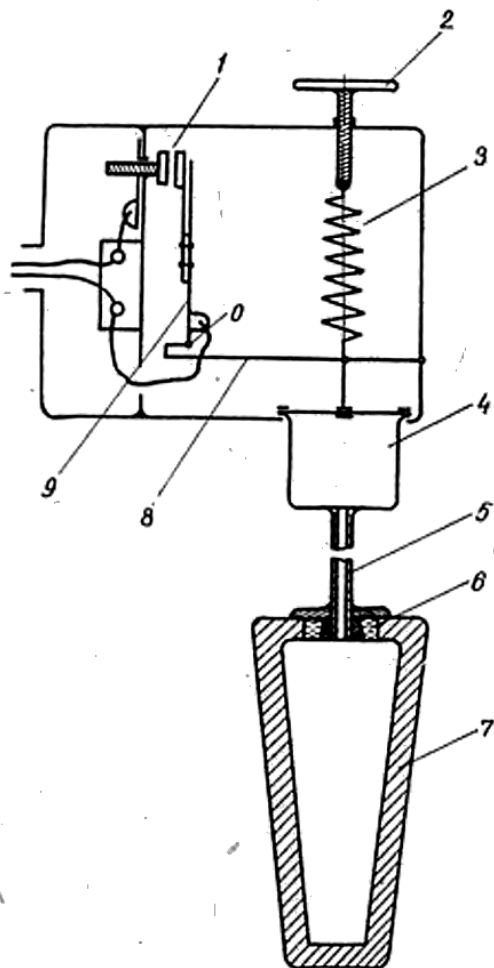
Рисунок 2 – Схема автоматической задвижки для переключения оросительных трубопроводов

Материалы и методы. В классической методике управление режимом орошения осуществлялось посредством тензиометрического датчика влажности почвы (рисунок 3). При снижении влажности ниже допустимого порога устройство замыкало электрическую цепь управления насосной станцией [4]. Конструктивно датчик включает керамический микропористый фильтр, полость с водой и золотниковые электроды управляющей цепи.

Опытным путём установлено, что зависимость $\frac{H}{R}$ (отношение рабочего напора дождевального аппарата H , м, к радиусу захвата струи R , м) от $\frac{H}{d}$ (отношение напора к диаметру сопла d , мм) описывается линейным уравнением [4] (рисунок 4).

$$\frac{H}{R} = 0,4 + 0,00025 \times \frac{H}{d} \quad (1)$$

При оптимальном соотношении $\frac{H}{d} = 2400$, соответствующем полному распаду струи, зависимость упрощается до $R = H$. При расстановке аппаратов по углам треугольника расстояние между параллельными трубопроводами $Z = 1,5 \cdot H$, между аппаратами $l = 1,73 \cdot H$ [4].



1 – контакт; 2 – регулировочный винт; 3 – пружина; 4 – герметичный баллон;
5 – латунная трубка; 6 – резиновая шайба; 7 – микропористый фильтр; 8...9 –
рычаг

Рисунок 3 – Схема тензиометрического влагомера

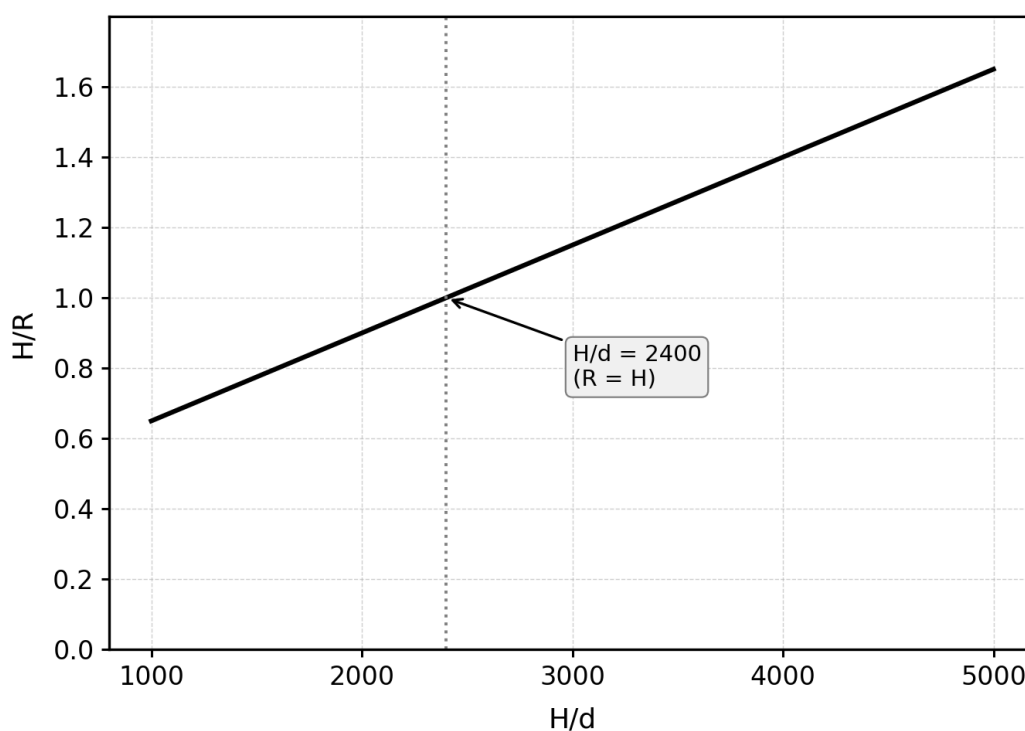


Рисунок 4 – График зависимости $\frac{H}{R}$ от $\frac{H}{d}$ для водяных струй (угол наклона 28...32°)

Средняя стоимость одного погонного метра асбоцементных труб зависит от диаметра D по квадратичному закону (рисунок 5) [4]:

$$C = a + b \times D^2, a = 0.3; b = 35 \quad (2)$$

Длина трубопроводов на гектар: $L_1 = \frac{10000}{Z}$ (м/га), где Z – расстояние между трубопроводами. Годовые амортизационные и ремонтные отчисления по трубопроводной сети (суммарная норма 10 %) [4]:

$$A = \frac{667}{H} (a + b \cdot D^2), \quad (3)$$

Расходы по энергии насосной станции на 1 га орошаемой площади:

$$C_2 = \frac{\gamma \times m \times S \times H}{3600 \times 75 \times \eta} \quad (4)$$

где $\gamma = 1000$ кг/м³; m – оросительная норма, м³/га; S – стоимость единицы энергии, руб.; η – КПД насосной станции. При $m = 2500$ м³/га, $S = 0,03$ руб., $\eta = 0,7$ получается $C_2 = 0,395 \cdot H$ [4]. Оптимальный напор соответствует абсциссе точки минимума кривой $A + C_2$ (рисунок 6).

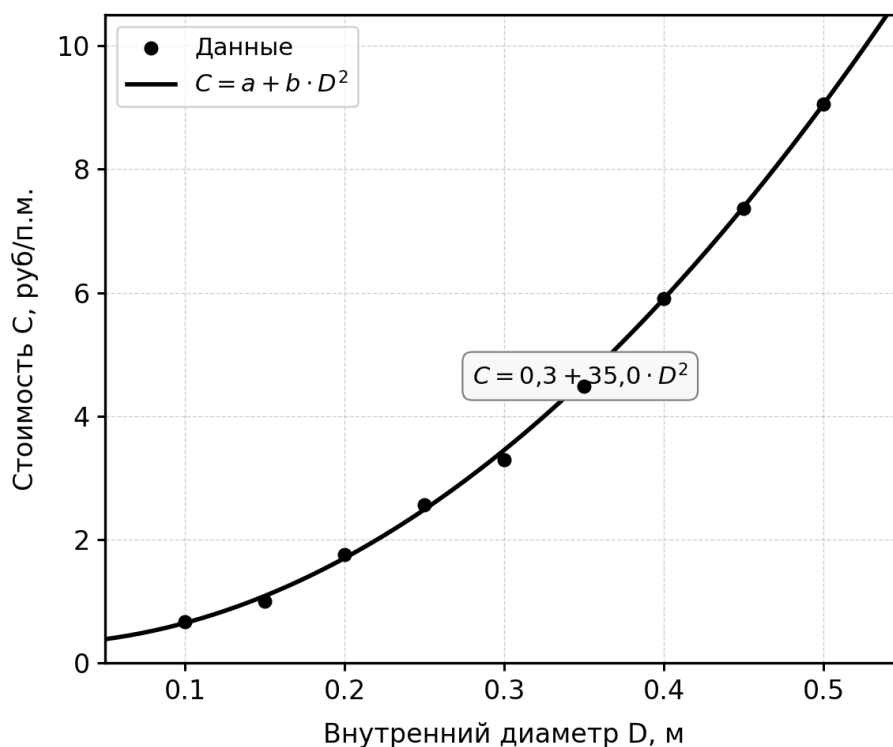
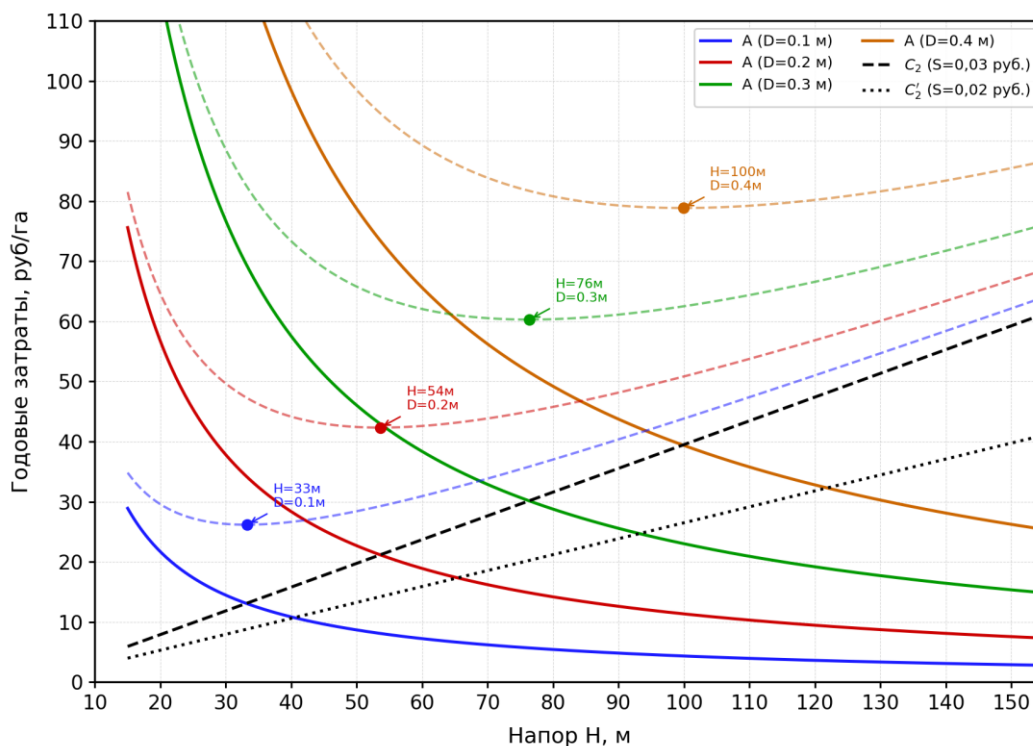


Рисунок 5 – Зависимость средней стоимости асбоцементной трубы от диаметра: точки – данные, кривая – $C = 0,3 + 35 \times D^2$



сплошные линии – A (амортизация), пунктир – $A + C_2$; точки минимума – оптимальные напоры

Рисунок 6 – Сводный график оптимальных параметров СДС

Результаты расчёта оптимальных параметров для трубопроводов постоянного диаметра представлены в таблице 1. Оптимальный напор изменяется от 33 м ($D = 0,1$ м) до 122 м ($D = 0,4$ м), расстояние между трубопроводами – от 50 до 183 м.

Таблица 1

**Оптимальные параметры СДС с постоянными диаметрами
трубопроводов**

Параметр	D=0,1 м S=0,03	D=0,1 м S=0,02	D=0,2 м S=0,03	D=0,2 м S=0,02	D=0,3 м S=0,03	D=0,3 м S=0,02	D=0,4 м S=0,03	D=0,4 м S=0,02
Расход трубопровода Q , м ³ /с	0,012	0,012	0,047	0,047	0,106	0,106	0,188	0,188
Оптимальный напор H , м	33	40	54	65	77	92	100	122
Расстояние между трубопроводами Z , м	50	60	80	97	115	138	150	183
Число дождевальных аппаратов n , шт.	4	3	4	3	4	3	4	3
Расход аппарата q , л/с	3	4	11,5	15,8	26,5	34	47	65
Расстояние между аппаратами l , м	57	69	93	112	133	159	173	210
Общая длина трубопровода L , м	228	210	370	340	530	480	690	630

Применение труб убывающего диаметра позволяет снизить стоимость сети. При условии постоянного гидравлического уклона диаметр на расстоянии l от начала трубопровода определяется формулой (5). По сравнению с постоянным диаметром оптимальный напор снижается на 15...25 % (таблица 2).

$$D = D_0 \cdot \left[\frac{k + \frac{L-l}{L}}{k+1} \right]^{2/5} = \quad (5)$$

Оптимальные параметры СДС с переменным диаметром трубопроводов

Параметр	$D_0=0,1$	$D_0=0,1$	$D_0=0,2$	$D_0=0,2$	$D_0=0,3$	$D_0=0,3$	$D_0=0,4$	$D_0=0,4$
	м $S=0,03$	м $S=0,02$	м $S=0,03$	м $S=0,02$	м $S=0,03$	м $S=0,02$	м $S=0,03$	м $S=0,02$
Расход трубопровода Q , м ³ /с	28	35	43	55	58	78	73	88
Оптимальный напор H , м	42	52	64	83	87	117	110	132
Расстояние между трубопроводами Z , м	4	3	4	3	4	3	4	3
Число дождевальных аппаратов n , шт.	3	4	11,5	15,8	26,5	34	47	65
Расход аппарата q , л/с	48	58	82	96	113	135	160	192
Расстояние между аппаратами l , м	194	174	328	290	452	406	640	576

К современным методам оптимизации параметров СДС относится, программный комплекс EPANET (EPA, США) является стандартом де-факто для гидравлического расчёта напорных оросительных сетей (рис. 7) [14, 16]. Он рассчитывает давление и скорость потока в каждом элементе сети при любой топологии и различных режимах водопотребления, что принципиально важно при последовательном переключении трубопроводов в СДС.

Инструмент FAST-GPU (2025) обеспечивает производительность, превышающую стандартный EPANET более чем в 6000 раз, что позволяет перебирать миллионы вариантов конфигурации сети для нахождения глобального оптимума диаметров и давлений [13].

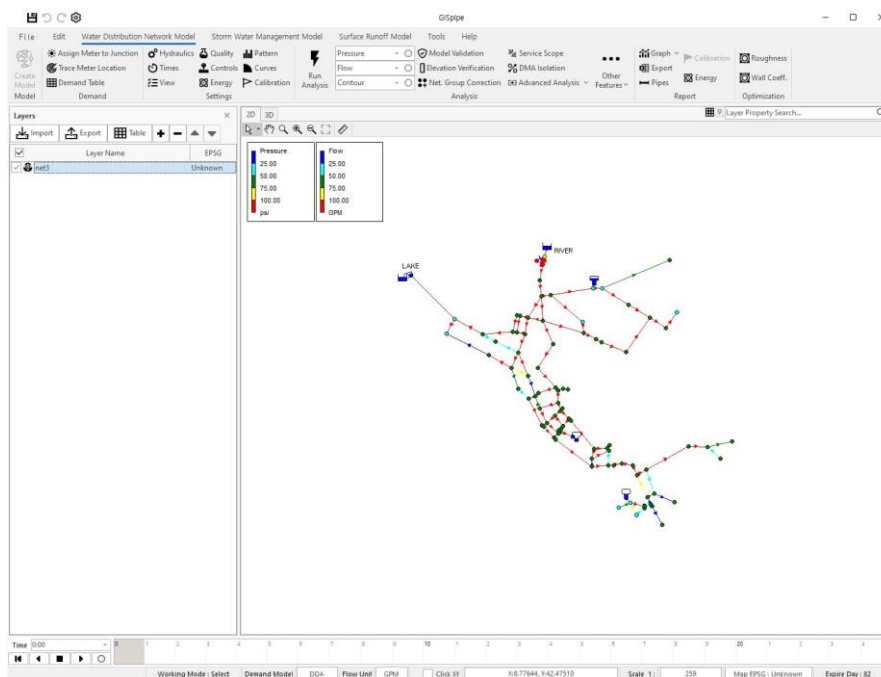


Рисунок 7 –Интерфейс программного комплекса GISpipe/EPANET для гидравлического моделирования оросительных сетей

Метод дискретной оптимизации решает задачу выбора оптимального диаметра для каждого участка разветвлённой сети как дискретную комбинаторную задачу при ограничениях: нормативное давление у каждого гидранта, минимальная скорость воды, стандартный сортамент труб. Целевая функция – минимизация суммарной стоимости сети с учётом штрафных функций за нарушение давлений [6, 10, 15]. Сочетание данного метода с EPANET устойчиво к множественным локальным минимумам и не требует непрерывности целевой функции [10, 14].

Системы VRI обеспечивают дифференцированную подачу воды по зонам поля на основе карт-заданий. Коэффициент равномерности распределения воды (CU) достигает 90 % и выше при экономии воды до 50 % по сравнению с традиционным поливом [12]. Продуктивность водопользования повышается в среднем на 20 %, энергопотребление снижается примерно на 18 % [12].

Интеграция беспроводных датчиков влажности почвы, метеостанций и контроллеров позволяет перейти от статического расчётного графика полива

к адаптивному управлению в реальном времени. По результатам 31-дневных испытаний IoT-управляемая система обеспечила экономию воды 35 % по сравнению с нормативным графиком эвапотранспирации [15].

Современные IoT-датчики (TDR, FDR, ёмкостные зонды) – функциональные цифровые аналоги тензиометрического датчика, описанного в классической методике (рисунок 3) – обеспечивают беспроводную передачу данных с частотой, недостижимой для механических систем [5].

Методы глубокого обучения (LSTM, CNN) и ансамблевые алгоритмы применяются для прогнозирования влажности почвы и испаряемости, а интеграция с данными дистанционного зондирования (NDVI) позволяет формировать карты норм орошения для VRI [10].

Цифровой двойник (Digital Twin, DT) – виртуальная гидравлическая модель, обновляемая в реальном времени данными датчиков SCADA и IoT. Применение DT обеспечивает постоянный мониторинг режимов работы, прогностическое техническое обслуживание и тестирование сценариев управления без остановки реальной системы [7, 8, 15].

Сравнительный анализ двух подходов представлен в табл. 3. Классическая методика остаётся актуальной как строгая аналитическая основа технико-экономической оптимизации СДС. Современные инструменты – численная оптимизация, IoT и цифровые двойники – дополняют её, решая задачи, которые аналитическими методами неразрешимы: учёт дискретности сортамента труб, пространственная неоднородность почвы, адаптивное управление в реальном времени.

**Сопоставление классической и современных методик проектирования
СДС**

Аспект	Классическая методика	Современные методы
Критерий оптимизации	$\min(A + C_2)$	$\min(A + C_2)$ + ограничения по давлению, CU, скоростям
Метод оптимизации	Аналитический (пересечение кривых)	Методы дискретной оптимизации, GPU-перебор (FAST-GPU)
Гидравлика	Формула Дарси–Вейсбаха, постоянный/убывающий диаметр	EPANET – полная нелинейная сеть
Управление поливом	Механические задвижки с сервомотором	IoT + SCADA + облачные платформы
Датчики влажности	Тензиометрический (керамический фильтр)	TDR, FDR, ёмкостные; Wi-Fi/LoRa
Равномерность полива	Не регулируется в реальном времени	$CU \geq 90\%$ (VRI + импульсное управление)
Учёт неоднородности поля	Не предусмотрен	GIS + NDVI + ML-карты норм
Цифровое моделирование	Аналитические кривые	Цифровой двойник (Digital Twin)
Экономия энергии	Через оптимальный напор H	Дополнительно -18% (VRI)
Экономия воды	Через Z и l	До -50% (VRI + IoT)

На основе проведённого анализа предлагается следующая последовательность проектирования стационарных дождевальных систем.

Этап 1. Сбор исходных данных и ГИС-анализ. Топографическая съёмка, составление ГИС-слоя почвенной неоднородности (текстура, водоудерживающая способность), формирование базы климатических данных для расчёта эвапотранспирации.

Этап 2. Предварительный аналитический расчёт. Применение классической методики (формулы 1...5, рисунки 4, 6) для определения диапазона допустимых напоров и диаметров – начальное приближение для численной оптимизации.

Этап 3. Гидравлическая оптимизация диаметров в EPANET/FAST-GPU. Определение оптимального набора диаметров для всех участков сети

методами дискретной оптимизации при соблюдении ограничений по давлению и скорости.

Этап 4. Проектирование системы управления. Выбор архитектуры IoT: типы и число датчиков влажности, метеостанций, расходомеров; протоколы беспроводной связи; облачная платформа управления.

Этап 5. Внедрение VRI. При выраженной почвенной неоднородности – разработка зональных карт нормы орошения на основе ML-моделей с данными дистанционного зондирования.

Этап 6. Создание цифрового двойника. Разворачивание цифрового двойника на основе гидравлической модели EPANET и данных датчиков для непрерывного мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций.

Выводы. Классическая методика впервые формализовала задачу технико-экономической оптимизации СДС и заложила алгоритмическую основу для расчёта диаметров трубопроводов, рабочих напоров и схем расстановки дождевальных аппаратов. Предложенные формулы и метод графического определения оптимальных параметров (рисунки 4...6, таблицы 1, 2) сохраняют методологическую ценность.

Современный арсенал – численная гидравлическая оптимизация, ГА, VRI, IoT, машинное обучение и цифровые двойники – дополняет классический подход: VRI обеспечивает $CU \geq 90$ % и экономию воды до 50 %; IoT снижает водопотребление на 35 %; GPU-ускоренная оптимизация позволяет перебирать миллионы вариантов конфигурации. Интеграция классического технико-экономического подхода с перечисленными методами формирует современную методику проектирования и эксплуатации СДС, обеспечивающую минимальные затраты, высокую равномерность полива и адаптивное управление водным режимом почвы.

Литература

1. ГОСТ 8224-1–2004. Машины дождевальные подвижные. Часть 1. Эксплуатационные характеристики и методы лабораторных и полевых

- испытаний. – М.: Стандартиформ, 2004. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044530>.
2. ГОСТ Р 58595–2019. Почвы. Отбор проб. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.
3. Кирейчева Л. В. Современные методы автоматизации управления режимами орошения / Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 44–51.
4. Лебедев Б. М. Методика определения оптимальных параметров стационарных дождевальных систем / Б. М. Лебедев. – М. : ВИСХОМ, 1963. – 29 с.
5. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: справочник. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 264 с. – URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008275977.
6. Рязанцев А. И. Механизация полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия в сложных условиях / А. И. Рязанцев. – Рязань: Рязаньагроинформ, 1991. – 131 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001598513>.
7. СП 100.13330.2016. Мелиорация. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85. – М. : Минстрой России, 2016. – 79 с.
8. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*. – М.: Минстрой России, 2021. – 157 с.
9. Штепа В. Н. Цифровые двойники в управлении мелиоративными системами / В. Н. Штепа // Мелиорация и водное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 28–34.
10. Alomari Z. M. Performance Assessment of Variable (VRI) Versus Constant Rate Irrigation (CRI): Review / Z. M. Alomari, T. J. Alfatlawi // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2024. – Vol. 19, № 1. – P. 1–10. – DOI: 10.18280/ijdne.190121.

11. Kumar S. V. Development of a smart IoT-based drip irrigation system for precision farming / S. V. Kumar [et al.] // *Irrigation and Drainage*. – 2022. – Vol. 71, № 5. – P. 1319–1333. – DOI: 10.1002/ird.2757.
12. Li M. Evaluation of variable rate irrigation management in forage crops: Saving water and increasing water productivity / M. Li [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2023. – Vol. 275. – Art. 108049. – DOI: 10.1016/j.agwat.2022.108049.
13. Marcuzzo F. F. N. The optimization of irrigation networks using genetic algorithms / F. F. N. Marcuzzo, E. C. Wendland // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2014. – Vol. 6, № 12. – P. 1124–1138. – DOI: 10.4236/jwarp.2014.612105.
14. Pereira L. S. Acceleration of pipeline analysis for irrigation networks through parallelisation in Graphic Processing Units / L. S. Pereira [et al.] // *Biosystems Engineering*. – 2025. – Vol. 253. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2025.01.003.
15. Ramos H. M. Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks / H. M. Ramos [et al.] // *Water*. – 2023. – Vol. 15, № 6. – Art. 1129. – DOI: 10.3390/w15061129.
16. Rossman L. A. EPANET 2 Users Manual / L. A. Rossman. – Cincinnati : U.S. Environmental Protection Agency, 2000. – 200 p. – (EPA/600/R-00/057).

References

1. GOST 8224-1-2004. Sprinklers are mobile. Part 1. Operational characteristics and methods of laboratory and field tests. Moscow: Standartinform, 2004. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044530>
2. GOST R 58595-2019. Soils. Sampling. – M.: Standartinform, 2019. – 16 p.
3. Kireicheva L. V. Modern methods of automation of irrigation regime control / L. V. Kireicheva, I. F. Yurchenko // *Environmental management*. – 2021. – No. 4. – pp. 44-51.
4. Lebedev B. M. Methodology for determining optimal parameters of stationary sprinkler systems / B. M. Lebedev. – M. : VISKHOM, 1963. – 29 C.

5. Resource-saving energy-efficient environmentally safe technologies and irrigation equipment: a reference book. Moscow : Rosinform Federal State Budgetary Institution, 2015. 264 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008275977
6. Ryazantsev A. I. Mechanization of irrigation with wide-range circular sprinkler machines in difficult conditions / A. I. Ryazantsev. – M.: Rating, 1991. – 131 p. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001598513> .
7. SP 100.13330.2016. Land reclamation. Updated edition of SNiP 2.06.03-85. Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2016. 79 p.
8. SP 31.13330.2021. Water supply. Outdoor networks and facilities. Updated version of SNiP 2.04.02-84*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2021. 157 p.
9. Shtepa V. N. Digital twins in the management of land reclamation systems / V. N. Shtepa // Land reclamation and water management. – 2022. – No. 3. – pp. 28-34.
10. Alomari Z. M. Evaluation of irrigation efficiency with variable (VRI) and constant flow rate (CRI): review / Z. M. Alomari, T. J. Alfathlavi // International Journal of Design, Nature and Ecodynamics. – 2024. – Volume 19, No. 1. – pp. 1-10. – DOI: 10.18280/ijdne.190121.
11. Kumar S. V. Development of an intelligent drip irrigation system based on the Internet of Things for precision agriculture / S. V. Kumar [et al.] // Irrigation and drainage. – 2022. – Volume 71, No. 5. – pp. 1319-1333. – DOI: 10.1002/identification number 2757.
12. Li M. Management assessment irrigation with a variable rate on forage crops: saving water and increasing its productivity / M. Li [et al.] // Water resources management in agriculture. – 2023. – Volume 275. – Article 108049. – DOI: 10.1016/j.agwat.2022.108049.
13. Markuzzo F. F. N. Optimization of irrigation networks using genetic algorithms / F. F. N. Markuzzo, E. S. Wendland // Journal of Water Resources and

Environmental Protection. - 2014. – Volume 6, No. 12. – pp. 1124-1138. – DOI: 10.4236/jwarp.2014.612105.

14. Pereira L. S. Acceleration of pipeline analysis for irrigation networks due to parallelization in graphics processors / L. S. Pereira [et al.] // Biosystem engineering. – 2025. – Volume 253. – pp. 1-14. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2025.01.003.

15. Ramos H. M. Intelligent water supply networks and a digital twin for managing the efficiency of systems in water distribution networks / H. M. Ramos [et al.] // Water. – 2023. – Volume 15, No. 6. – Article 1129. – DOI: 10.3390/w15061129.

16. Rossman L. A. EPANET User's Guide 2 / L. A. Rossman. Cincinnati : United States Environmental Protection Agency, 2000. 200 p. (EPA/600/R-00/057).

© Рязанцев А.И., Антипов А.О., Евсеев Е.Ю., Малько И.В. 2026. *International agricultural journal*, 2026, № 4, 58-75.