

Оптимизация систем водоснабжения на основе критерия стоимости их жизненного цикла

И.А. Абросимова¹, В. А. Бобер^{2✉}, Р.Н. Ярыгин³, Б. Мэндбаяр⁴

^{1,2,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

⁴Физико-технический институт Монгольской академии наук, Улан-Батор, Монголия

Аннотация. Переход на технологии информационного моделирования является логическим и неизбежным этапом развития человечества. Процессы компьютеризации, которые происходят во всех сферах знания, неизбежно в количественном отношении перерастут в новое качество. Технологии информационного моделирования предполагают разработку, наполнение и развитие цифровых двойников существующих и проектируемых систем водоснабжения, которые должны охватывать весь их жизненный цикл, начиная с замысла, проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации. Цифровые двойники – это не только графическая визуализация и представление объекта в виде 3D-моделей, но и моделирование режимов функционирования объекта и его реакции на внешние меняющиеся условия. В системах водоснабжения – это модели распределения потоков и движения воды в напорных трубопроводах в статических и динамических режимах эксплуатации. Следует отметить, что переход на цифровые модели позволяет существенно увеличить число анализируемых вариантов проектируемой системы водоснабжения и детально рассмотреть все возможные этапы их жизненного цикла. В этом отношении эффективным является критерий стоимости жизненного цикла системы. Однако применение этого критерия требует определенных исследований и оценки получаемых результатов, особенно при решении схемно-структурных и схемно-параметрических задач оптимизации, поскольку эти задачи обеспечивают наибольший экономический эффект.

Ключевые слова: системы водоснабжения, транспортная система водоснабжения, граф, надежный граф, затраты на жизненный цикл, коэффициент дисконтирования

Для цитирования: Абросимова И.А., Бобер В.А., Ярыгин Р.Н., Мэндбаяр Б. Оптимизация систем водоснабжения на основе критерия стоимости их жизненного цикла // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 2. С. 221–235. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-2-221-235>. EDN: XYGDSV.

Original article

Optimization of water supply systems based on the cost criterion of their life cycle

Ivanna A. Abrosimova¹, Viktor A. Bober^{2✉},
Roman N. Yarygin³, Bayarsaikhan Mendbayar⁴

^{1,2,3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁴Institute of Physics and Technology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract. The transition to information modeling technologies is a logical and inevitable stage in the development of mankind. The computerization processes that occur in all fields of knowledge will inevitably grow into a new quality in quantitative terms. Information modeling technologies involve the development, filling and development of digital counterparts of existing and projected water supply systems, which should cover their entire life cycle, starting with the conception, design, construction, operation and disposal. Digital doubles are not only graphical visualization and representation of an object in the form of 3D models, but also modeling of the modes of operation of an object and its response to changing external conditions. In water supply systems, these are models of the distribution of flows and movement

of water in pressure pipelines in static and dynamic operating modes. It should be noted that the transition to digital models makes it possible to significantly increase the number of analyzed variants of the projected water supply system and to consider in detail all possible stages of their life cycle. In this regard, the criterion of the cost of the system lifecycle is effective. However, the application of this criterion requires certain studies and evaluation of the results obtained, especially when solving circuit-structural and circuit-parametric optimization problems, since these tasks provide the greatest economic effect.

Keywords: water supply systems, transport water supply system, graph, reliable graph, life cycle costs, discount rate

For citation: Abrosimova I.A., Bober V.A., Yarygin R.N., Mendbayar B. Optimization of water supply systems based on the cost criterion of their life cycle. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(2):221-235. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-2-221-235>. EDN: XYGDSV.

ВВЕДЕНИЕ

Современный город невозможно представить без такой важной системы жизнеобеспечения как водоснабжение, от состояния и работоспособности которой зависит благополучие и здоровье населения, а также санитарное состояние городской территории и городского пространства. В тоже время эта система является капиталоемкими и крупным потребителем труб из различных материалов, электроэнергии и электросилового оборудования. Она также имеет сложные многоуровневые и пространственно-распределенные структуры. Управление проектированием, строительством и эксплуатацией такой системы требует глубокой автоматизации и цифровизации протекающих в них технологических процессов [1–3]. Построение цифрового двойника системы водоснабжения связано с моделированием режимов функционирования объекта и его реакции на внешние меняющиеся условия [4–8]. В системах водоснабжения внимание уделяется моделям распределения потоков и движения воды в напорных трубопроводах в статических и динамических режимах эксплуатации.

ГОСТ Р 58785–2019 «Качество воды. Оценка стоимости жизненного цикла для эффективной работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» рекомендует сравнение вариантов осуществлять на основе следующей формулы [1]:

$$\text{СЖЦ} = \sum_{t=t_1}^T \left(\frac{K_t^e}{(1+r)^t} \right) + \sum_{t=t_2}^T \left(\frac{C_t^{\text{эк}}}{(1+r)^t} \right) + C_d^y, \quad (1)$$

где K_t^e – капиталовложения в объекты водоснабжения и водоотведения по периодам строительства, капитального ремонта и реконструкции, начиная с момента времени t_1 , $C_t^{\text{эк}}$ – ежегодные эксплуатационные затраты по трубопроводам, насосным станциям и др. сооружениям, начиная с периода времени t_2 , когда системы начинают функционировать, C_d^y – затраты на разборку и утилизацию отслужившего свой срок оборудования, T – расчетное время жизненного цикла, r – норма дисконта (величина ставки рефинансирования, установленная Центральным банком Российской Федерации, например, на 2025 г. он установил 21 %) играет роль базового уровня, в сравнении с которым оценивается экономическая эффективность варианта проекта.

МЕТОДЫ

В ГОСТ Р 58785–2019 прописано то, как формировать единовременные капиталовложения и эксплуатационные затраты, но отсутствуют рекомендации по назначению расчетного времени жизненного цикла, хотя этот показатель является одним из главных составляющих в формуле (1). Если расчетное время принять от 8 до 10 лет, то формула (1) будет соответствовать критерию проведенных затрат, а время будет соответствовать нормативному сроку эффективности капиталовложений [11–17]. Если T принять наименьшему кратному сроку службы составляющих сооружений и трубопроводов, то оно будет исчисляться сотнями и даже тысячами лет. Даже при $T = 100$ лет коэффициенты дисконтирования (2), при норме дисконта $r = 21\%$, принятой в 2025 г., приведут к обнулению затрат жизненного цикла (1).

$$R_{1,2}^0 = \sum_{t=t_{1,2}}^T \left(\frac{1}{(1+r)^t} \right), \quad (2)$$

Возникает несколько вопросов: как назначить данное время, каким параметрам оно должно соответствовать, на сколько необходимо учитывать срок службы оборудования, если опираться

на показатели срока службы оборудования, то по каким критериям необходимо вести его отбор и выбирать рациональное значение? Эти вопросы являются предметом исследования в настоящей работе. Также на примере численных экспериментов показаны особенности применения формулы (1) как критерия оценки проектных решений проектируемой системы водоснабжения с использованием классических методов оптимизации.

Если рассматривать укрупненную модель жизненного цикла объектов капитального строительства, то его можно разделить на четыре основных этапа (рис. 1):

- замысел;
- строительство;
- эксплуатация;
- ликвидация.

Наиболее сложными и ответственными являются этапы «замысел» и «строительство», от их эффективности зависит стоимость наиболее продолжительного этапа «эксплуатация». В системах водоснабжения среди составляющих эксплуатационных затрат доминирующими является электроэнергия. Чтобы ее минимизировать надо уменьшать потери напора, следовательно, требуется увеличивать диаметры трубопроводов, что на уровне строительства приводит к увеличению капиталовложений.



Рис. 1. Укрупненная схема жизненного цикла сооружения
Fig. 1. An enlarged scheme of the building's life cycle

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Капиталовложения в системы водоотведения для технико-экономических расчетов можно определять на основании укрупненных нормативов цен строительства НЦС-81-02-14-2025, НЦС-81-02-19-2025. Годовые эксплуатационные затраты рассчитываются на основе документа Федеральной службы по тарифам приказ от 27 декабря 2013 г. № 1746-э «Об утверждении методических указаний по расчету регулируемых тарифов в сфере водоснабжения и водоотведения».

Согласно приведенным документам, затраты на эксплуатацию систем водоснабжения (тыс. руб./г.) определяются следующим образом:

$$\mathcal{E}_3 = C_{ам} + C_{к.р} + C_{т.р} + C_{элк} + C_{фзп} + C_{св} + C_{пр}, \quad (3)$$

где $C_{ам}$ – амортизационные отчисления (принимается $0,05 \cdot K$ по трубопроводам, $0,09 \cdot K_i^y$ по насосным станциям), $C_{к.р}$ – затраты на капитальный ремонт ($0,046 \cdot K_i^y$), руб./г., $C_{т.р}$ – затраты на текущий ремонт ($0,01 \cdot K_i^y$), руб./г., $C_{элк}$ – стоимость электроэнергии, тыс. руб./г.:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_{элк} \cdot H \cdot x, \quad (4)$$

где $z_{элк}$ – единичная стоимость электроэнергии (руб. за кВт/ч), x – расход транспортируемых стоков ($\text{м}^3/\text{с}$), H – напор насосной станции (м. в. ст.).

Фонд оплаты труда и страховые взносы, составляют:

$$C_{фзп} = 1,5 \cdot 12 \cdot 3П_{ср} \cdot Ч_{ср}, \quad (5)$$

где $3П_{ср}$ – средняя заработная плата в месяц по предприятию, тыс. руб., $Ч_{ср}$ – средняя численность предприятия, обслуживающего системы водоснабжения.

В итоге эксплуатационные затраты по трубопроводам можно представить следующей формулой:

$$\mathcal{E}_{zi} = 0,056 \cdot K_{тр} + C_{элк} + 19,28 \cdot L_i^{0,77} \cdot 3П_{ср}, \quad (6)$$

где 0,056 проценты на текущий и капитальный ремонт, L – длина трубопровода в км, $3П_{ср}$ – средняя заработная плата по предприятию, которое обслуживает трубопроводные системы, тыс. руб. в мес.

Если в эксплуатационных затратах учитывать амортизационные отчисления и не учитывать коэффициенты дисконтирования затрат, то формулу (1) можно привести к простому виду:

$$СЖЦ = K + T_{HKP} \cdot \mathcal{E}_{zi}, \quad (7)$$

где T_{HKP} – наименьшее кратное сроков службы сравниваемых вариантов, год (например, из трубопроводов различного материала).

Для исследования формулы (7) рассмотрим трубопроводы стальные, полиэтиленовые (ПВХ), железобетонные (ЖБ), высокопрочный чугун (ВЧШГ) и определим для них наименьшее кратное:

$$T_{HKP} = (25, 50, 100, 100) = 100 \text{ лет.}$$

Для трубопроводов диаметром 1000 мм и длиной 1 км результаты расчета СЖЦ представлены в табл. 1, из которых следует, что оптимальным будет трубопровод из ПВХ, хотя по стоимости самыми дешевыми являются трубы из ЖБ (на период 2025 г.).

Таблица 1. Обоснование варианта по критерию стоимости жизненного цикла, d1000 мм

Table 1. Justification of the option based on the criterion of life cycle cost, d1000 mm

№ п/п	Название ПХГ	Срок службы	Стоимость прокладки, на 1 км, тыс. руб.	Стоимость эксплуатации, тыс. руб. в г.	Количество переключений	Кап. вложения	Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	Суммарные затраты, тыс. руб.
1	сталь	25	69 747,3	17 936,4	4	278 989,2	1 793 640	2 072 629,2
2	ПВХ	100	63 298,5	5857,7	1	63 298,5	585 770	649 068,5
3	ЖБ	50	52 078,4	8136,8	2	104 156,8	813 680	917 836,8
4	ВЧШГ	100	125 758,3	9355,5	1	125 758,3	935 550	1 061 308,3

СЖЦ с учетом коэффициентов дисконтирования можно представить следующей формулой:

$$СЖЦ = R_1^0 \cdot K + R_2^0 \cdot T_{HKP} \cdot \mathcal{E}_{zi}, \quad (8)$$

где R_1^0 – коэффициент дисконтирования затрат, для $r = 21\%$ уже при $T_{HKP} = 35$ лет он будет равен 0,001693, т. е. будущие затраты будут обесценены почти в 1000 раз.

Если взять наименьшее кратное из следующих значений сроков службы различных материалов труб, $T_{HKP} = (26, 51, 71, 93) = 8755578$, то СЖЦ, например, по оптимальному варианту, составят 0,001 руб. Таким образом, при значительной кратности отдаленные затраты будут стремиться к нулю и выбрать какой-то вариант будет невозможно.

В этом случае возникает основной конфликт между эксплуатационными затратами, рассчитанными на стадии проектирования объекта, и первоначальными капиталовложениями. Если считать, что системы водоснабжения относятся к возобновляемым объектам коммунального хозяйства, то их срок службы будет стремиться к бесконечности и критерий (8) будет стремиться к нулю. В работах [14–18] в этом случае предлагается следующий критерий оценки вариантов:

$$ДЗ = K + \mathcal{E}_z/r, \quad (9)$$

где r норма дисконта (величина ставки рефинансирования в 2025 г. составила 21 %). В эксплуатационных затратах учитываются амортизационные отчисления. В табл. 2 для диаметра 1000 мм

и длиной 1 км проведены расчеты согласно (9) для различных возможных ставок рефинансирования, оптимальным является вариант из труб ЖБ, и только для $r = 1\%$ выгодным будут трубы из ПВХ. При $r = 12\%$ формула (9) будет представлять приведенные затраты.

Таблица 2. Обоснование варианта по критерию дисконтированных затрат (9)

Table 2. Justification of the option based on the discounted cost criterion (9)

№ п/п	Название ПХГ	Срок службы	Стоимость прокладки, на 1 км, тыс. руб.	Стоимость эксплуатации, тыс. руб. в год	$r = 1\%$, или $T = 100$	$r = 2\%$, или $T = 50$	$r = 5\%$, $T = 25$	$r = 12\%$, $T = 8,333$	$r = 21\%$, $T = 4,76$
1	сталь	25	69 747,3	9008,7	2 072 629,2	520 184,3	294 964,8	249 921,3	112 628,7
2	ПВХ	100	63 298,5	6490,7	649 068,5	387 833,6	225 566	193 112,5	94 194,2
3	ЖБ	50	52 078,4	6271	917 836,8	365 626,3	208 852,4	177 497,6	81 628,3
4	ВЧШГ	100	125 758	10 613	1 061 308,3	656 410,7	391 083,3	338 018,3	176 276,2

Проведенные численные эксперименты подтверждают, что от назначения расчетного времени жизненного цикла зависит обоснованность принимаемых решений.

Построим и исследуем функцию затрат жизненного цикла в зависимости от расхода транспортируемых воды. Для единовременных капиталовложений воспользуемся НЦС-81-02-14-2025 и рассмотрим полиэтиленовые трубы марки ПЭ 100 SDR 17, срок службы 50 лет, значения капиталовложений для которых представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3. Расчет капиталовложений по трубопроводным системам водоснабжения применительно к условиям г. Москвы

Table 3. Calculation of capital investments for pipeline water supply systems in relation to the conditions of Moscow

Разработка сухого грунта в отвал, без крепления (группа грунтов 1–3)										
Диаметр, мм	Стоимость за 1 км, тыс. руб.	Глубина, м	Группа грунтов	$K_{пер}$	Кэф. район $K_{пер}/зон$	$K_{пер2}$ снего борьба	Сейсмика	Длина, км	Суммарная стоимость	Стоимость с НДС
160	6571,92	2	1–3	1,0	1	1	1,0	1	6571,92	7335,5
200	7674,46	2	1–3	1,0	1	1	1,0	1	7674,46	8557,02
315	10 838,08	2	1–3	1,0	1	1	1,0	1	10 838,08	12 084,46
400	14 896,92	2	1–3	1,0	1	1	1,0	1	14 896,92	16 610,07
500	21 352,20	2	1–3	1,0	1	1	1,0	1	21 352,20	23 807,7
630	28 692,72	3	1–3	1,0	1	1	1,0	1	28 692,72	31 992,38
800	42 374,62	3	1–3	1,0	1	1	1,0	1	42 374,62	47 247,7
1000	63 298,54	3	1–3	1,0	1	1	1,0	1	63 298,54	70 577,87

В итоге получены следующие зависимости:

разработка сухого грунта в отвал, без крепления (группа грунтов 1–3)

$$K1 = (41091 \cdot d^2 - 13743 \cdot d + 10287) \cdot L;$$

разработка мокрого грунта в отвал, без крепления (группа грунтов 1–3)

$$K1 = (42974 \cdot d^2 - 12928 \cdot d + 13580) \cdot L;$$

разработка сухого грунта в отвал, без креплений (группа грунтов 4)

$$K1 = (42924 \cdot d^2 - 11163 \cdot d + 12187) \cdot L;$$

разработка мокрого грунта в отвал, без креплений (группа грунтов 4)

$$K1 = (45052 \cdot d^2 - 9635,4 \cdot d + 15946) \cdot L;$$

$K1$ – капиталовложения в трубопровод, в тыс. руб., d – диаметр, в м.

Если обозначить расход воды через x , м³/с, а v – скорость движения воды, м/с, то:

$$d = \sqrt{\frac{4x}{\pi v}}, \quad (10)$$

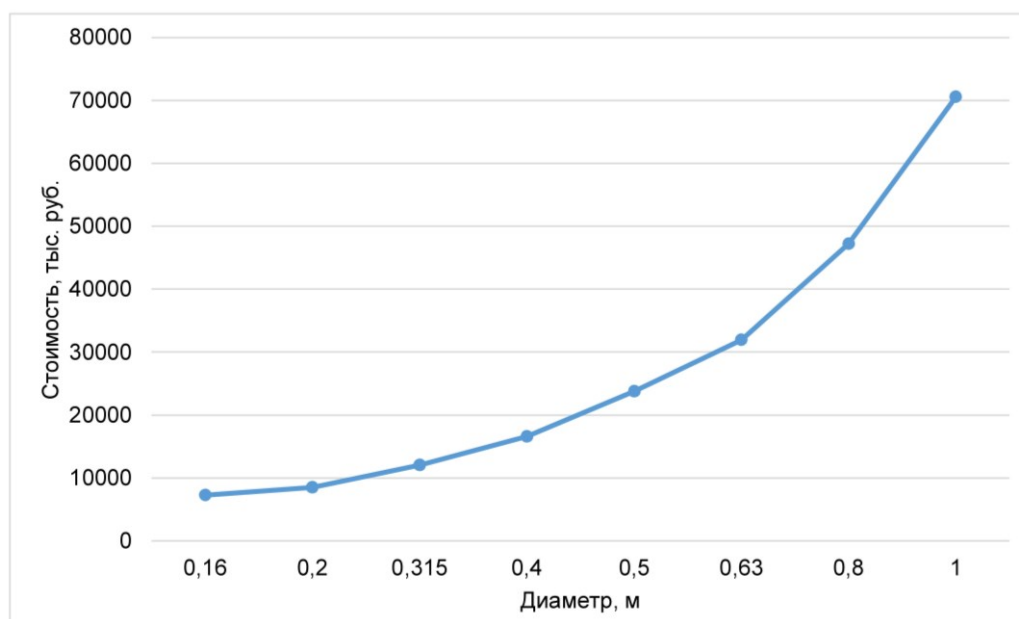


Рис. 2. Зависимость капиталовложений от диаметра трубопровода
Fig. 2. Dependence of investments on pipeline diameter

В работе [12] на основе затрат жизненного цикла определены оптимальные скорости движения сточной жидкости в напорных трубопроводах и вычисляются по следующей формуле:

$$v_i = \frac{a \cdot x_i^b}{Z^c \cdot T^d}, \quad (11)$$

где Z – стоимость 1 кВт/ч. электроэнергии; T – время жизненного цикла, а, b, c, d коэффициенты аппроксимации, x – расход сточной жидкости, м³/с.

При $T = 100$ лет (для г. Москва):

$$v_i = \frac{4,5 \cdot x_i^{0,477}}{6,99^{0,287} \cdot 100^{0,14}} = 1,35 \cdot x_i^{0,477}$$

Подставляя данное выражение в формулу (10), получим:

$$d = 0,97 \cdot x^{0,261}.$$

разработка сухого грунта в отвал, без крепления (группа грунтов 1–3)

$$K1 = (79\,716,54 \cdot x^{0,523} - 13\,330,71 \cdot x^{0,262} + 10\,287) \cdot L;$$

разработка мокрого грунта в отвал, без крепления (группа грунтов 1–3)

$$K1 = (40\,434,2 \cdot x^{0,523} - 12\,540,16 \cdot x^{0,262} + 13\,580) \cdot L;$$

разработка сухого грунта в отвал, без креплений (группа грунтов 4)

$$K1 = (40\,387,19 \cdot x^{0,523} - 10\,828,11 \cdot x^{0,215} + 12\,187) \cdot L;$$

разработка мокрого грунта в отвал, без креплений (группа грунтов 4)

$$K1 = (42\,389,43 \cdot x^{0,523} - 9\,346,34 \cdot x^{0,262} + 15\,946) \cdot L;$$

Гидравлический расчет напорных трубопроводов из полиэтилена осуществляется по [11]:

$$h_i = 1,1 \cdot Y_i \cdot L_i, \quad Y_i = 0,000685 \cdot \frac{v_i^{1,774}}{d_i^{1,226}}, \quad (12)$$

где Y_i – гидравлический уклон, L_i – длина участка сети, в м. С учетом (12) и (11):

$$y = 0,000591 \cdot L_i \cdot \frac{v_i^{2,387}}{x_i^{0,613}}, \text{ или } y = 0,000333 \cdot L_i \cdot x_i^{0,526}$$

$$h_i \cdot x_i = 0.000333 \cdot L_i \cdot x_i^{1.526}, \text{ или в км: } h_i \cdot x_i = 0.333 \cdot L_i \cdot x_i^{1.526} \quad (13)$$

Стоимость электроэнергии, тыс. руб./г.:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_{элк} \cdot H \cdot x, \quad (14)$$

где $z_{элк}$ – единичная стоимость электроэнергии (руб. за кВт/ч.); x – расход транспортируемых стоков (м³/с); H – напор насосной станции (м. в. ст.).

Из формулы (13) следует, что

$$H \cdot x = h \cdot x + p \cdot Q$$

Энергия, приносимая в трубопроводный участок сети, тратится на преодоления сил трения, за вычетом энергии на излив в конце участка у потребителя, $Q = x$, p – остаточный напор у потребителя воды.

Таким образом, затраты электроэнергии можно представить как функцию транспортируемого расхода воды и длины трубопровода:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_{элк} \cdot (0.333 \cdot L_i \cdot x_i^{1.526} + p_i \cdot x_i), \text{ Л в км.} \quad (15)$$

С учетом (15) эксплуатационные затраты (6) будут определяться по следующей формуле:

$$\Delta_{zi} = 0,116 \cdot K_{тр} + 0,164 \cdot K_{КНС} + C_{эл} + 19,28 \cdot L_i^{0,77} \cdot 3\Pi_{ср}. \quad (16)$$

Капиталовложения в насосные станции водоснабжения определяются согласно НЦС-81-02-19-2025, табл. 19-04-001. После обработки данных этой таблицы получена следующая формула:

$$K = 7\,545,1 + 486\,118 \cdot x_i, \quad (17)$$

С учетом стоимости жизненного цикла за 50 лет (7) и дисконтированных затрат за 4,76 лет, с помощью формулы (9), включая формулы (15) и (16), можно построить зависимости СЖЦ от расходов транспортируемой воды, которые с достаточной достоверностью (0,99) аппроксимируются линейными функциями следующего вида, где x расход в м³/с, СЖЦ – стоимость в тыс. руб.:

$$\text{ЗЖЦ}(50) = 184366 \cdot x + 142838, \text{ для одной трубы, длиной 1 км;} \quad (18)$$

$$\text{ДЗ}(4.76) = 38489 \cdot x + 21581, \text{ для одной трубы, длиной 1 км.} \quad (19)$$

Следовательно, для поиска оптимальных структур и параметров систем водоснабжения можно воспользоваться методами линейного программирования, в частности потоковыми моделями и алгоритмом Форда Фалкерсона [9, 10].

С математической точки зрения решается следующая задача линейного программирования: требуется минимизировать функцию затрат жизненного цикла (7) или (9), которая в виде линейной аппроксимации представлена формулами (18) или (19), при выполнении условия баланса потоков транспортируемой воды в сети и ограничений на потоки по каждому участку сети:

$$\sum_{i=1}^n (B_i + C_i \cdot x_i) \rightarrow \min, \quad (20)$$

$$A \cdot x = q_{об}. \quad (21)$$

$$\text{при } \underline{v}_i \leq x_i \leq \bar{v}_i \quad (22)$$

Уравнение (20) – минимизируемая стоимость жизненного цикла в систему водоснабжения, уравнение (21) – условие материального баланса потоков воды в узлах схемы (A – матрица смежности узлов и участков сети). Уравнение (22) – ограничения на расходы транспортируемой воды по участкам сети, n – количество участков транспортной сети, B_i , C_i – коэффициенты аппроксимации стоимости единицы транспортируемого потока по участку сети, тыс. руб. за 1 м³, x_i – искомый поток на участке транспортной сети, л/с, $q_{об}$ – вектор расчетных расходов у абонентов, м³/с, $\underline{v}_i$, $\bar{v}_i$ – нижние и верхние ограничения на потоки.

Модель системы водоснабжения, представленная графом с весовыми функциями, преобразуется в транспортную сеть с узлами входа (s) и выхода (t) потоков. Для этого все вершины – абоненты замыкаются дугами на узел t . Эти дуги будут моделировать работу потребителей воды и на их потоки накладываются ограничения, в точности равные величинам отбора воды абонентами.

Работа метода начинается с выбора маршрута от S к t , который соответствует минимальному значению сумме величин стоимости потока $\sum_{i=1}^n (B_i + C_i \cdot x_i) \cdot L_i$, при $x_i = 1$ и выполнении условия (22). Этот маршрут обязательно пройдет через ветвь, которая моделирует абонент и эта ветвь «насытится». Следовательно, количество итераций будет соответствовать числу абонентов, после чего граф распадется на два несвязанных подграфа, т. е. вершина входа потоков будет не связана с

основным графом. В итоге будет получена оптимальная трасса системы водоснабжения, потоки, и, следовательно, диаметры трубопроводов.

Для иллюстрации и адаптации предлагаемого подхода к системам водоснабжения, рассмотрим проектируемый новый жилой район, для которого необходимо построить систему водоснабжения. Пусть известными величинами будут длины водопроводных участков сети и расчетные расходы воды у абонентов. На рис. 3 представлена расчетная схема в виде графа с 9 вершинами и 12 ребрами, 8 абонентов и 1 источник (вершина 1).

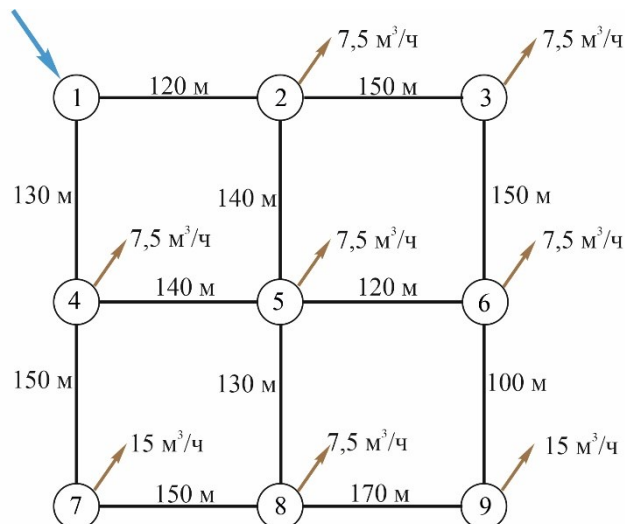


Рис. 3. Существующая схема системы водоснабжения с расходами
Fig. 3. Existing water supply system diagram with costs

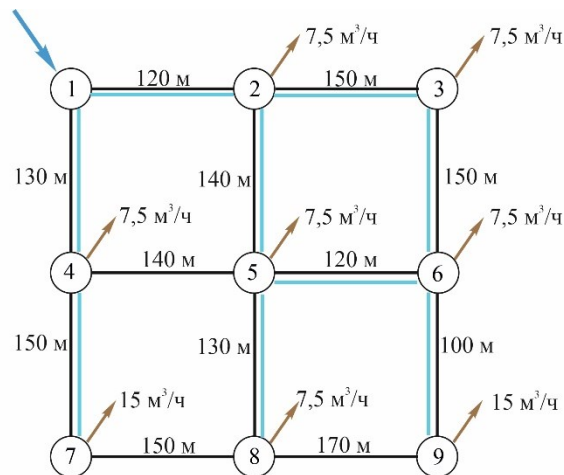


Рис. 4. Система потокораспределения, построенная с использованием алгоритма Дейкстры
Fig. 4. Flow distribution system built using Dijkstra's algorithm

На рис. 4 представлен вариант распределения потоков в виде дерева кратчайших расстояний (голубым цветом), полученный на основе алгоритма Дейкстры [3]. На рис. 5 представлена транспортная сеть, в которой каждый абонент моделируется дугой, замыкаемой на узел выхода потоков t . Для каждой такой фиктивной ветви приписаны ограничения на потоки, равные нагрузкам абонентов.

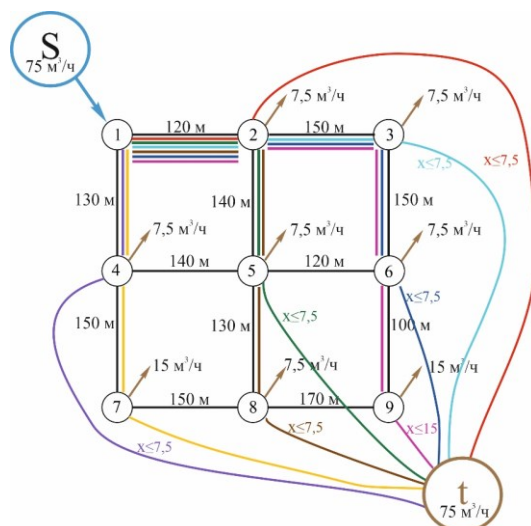


Рис. 5. Транспортная сеть системы водоснабжения
Fig. 5. Water supply system transport network

В табл. 4 приведены оптимальные маршруты от $S-t$ и их максимальные пропускные способности. Следует отметить, что оптимальный маршрут будет обязательно проходить через ветвь, которая моделирует какой-то абонент и максимальный поток будет соответствовать нагрузке этого

абонента. Перед построением следующего оптимального маршрута, дуга, которая моделирует рассмотренный абонент, удаляется из транспортной сети, и все вычисления повторяются до момента отсутствия всех дуг-абонентов и распада графа на основной и с вершиной t (рис. 6).

Таблица 4. Определение потоков водоснабжения заданных объектов

Table 4. Determination of water supply flows for specified objects

Обозначение участка	Наикратчайший путь	Потокораспределение, q_i	Максимальный поток на участке, q_{max}
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow t$	$7,5 \cdot 1,3 = 9,75$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow t$	$7,5 \cdot 1,4 = 10,5$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow t$	$(7,5 \cdot 1,3) + (7,5 \cdot 1,5) = 21$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow t$	$(7,5 \cdot 1,3) + (7,5 \cdot 1,6) = 21,75$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow t$	$(15 \cdot 1,4) + (15 \cdot 1,6) = 45$	15
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow t$	$(7,5 \cdot 1,3) + (7,5 \cdot 1,5) + (7,5 \cdot 1,4) = 31,5$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow t$	$(7,5 \cdot 1,3) + (7,5 \cdot 1,6) + (7,5 \cdot 1,6) = 33,75$	7,5
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow t$	$(15 \cdot 1,3) + (15 \cdot 1,6) + (15 \cdot 1,6) + (15 \cdot 1) = 82,5$	15

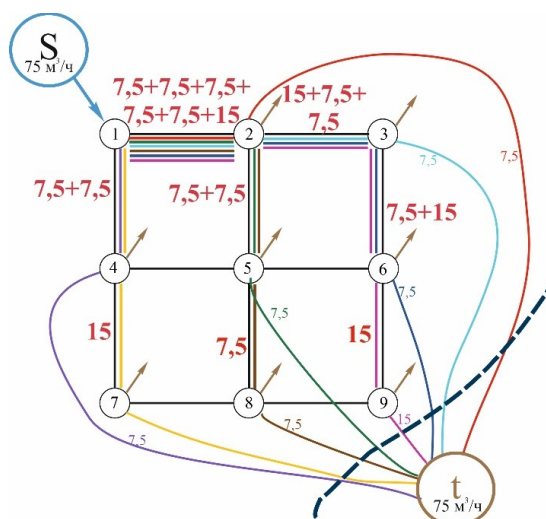


Рис. 6. Транспортная сеть системы водоснабжения с разрывом графов

Fig. 6. Water supply system transport network with graph break

Следующий этап заключается в определении расходов по ветвям схемы путем их сложения от наложения каждого оптимального маршрута. Итоги представлены в табл.5

Таблица 5. Определение расходов воды на заданных участках

Table 5. Determination of water consumption in specified areas

Обозначение участка	Наикратчайший путь	Расход на участке Q_i
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow t$	$7,5+7,5+7,5+7,5+7,5+15 = 52,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow t$	$7,5+15=22,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow t$	$52,5+15=67,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow t$	$52,5+30 = 82,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow t$	$22,5 + 15 = 37,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow t$	$52,5 + 15 + 7,5 = 75 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow t$	$52,5 + 30 + 22,5 = 105 \text{ м}^3/\text{ч}$
	$S \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow t$	$105 + 15 = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$

В итоге, определена оптимальная по стоимости жизненного цикла схема системы водоснабжения, она будет соответствовать древовидной структуре, и «дереву» кратчайших расстояний, что справедливо для новой сети водоснабжения без учета фактора надежности.

Следует отметить, если бы оптимизировалась существующая и реконструируемая система водоснабжения, то на трубопроводные участки сети накладывались бы ограничения по потокам (22) и уже решение бы было другое и схема водоснабжения могла бы быть кольцевой. Согласно СП 31.13330.2021 [17–20] при построении кольцевых систем водоснабжения должны быть резервирующие ветки на случай аварии. Соответственно возникает потребность в построении надежного графа и проверки системы на аварийность.

Для формирования резервных магистралей относительно уже полученной оптимальной древовидной схемы системы водоснабжения предлагается следующий подход.

Моделируются аварийные отключения каждого участка выбранной схемы и на основе алгоритма Дейкстры [9], начиная от источника водоснабжения, строится «дереву» кратчайших расстояний, для которого определяются потоки движения воды.

Таких «деревьев» будет столько, сколько будет моделироваться аварийных отключений для выбранной оптимальной схемы. В итоге формируется матрица возможных расходов по всем участкам кольцевой сети (табл. 6), где второй столбец обозначает отключаемые участки. Строки показывают расходы по другим участкам, включая резервные.

Определяются максимальные и средние значения расходов для каждого участка сети.

На основании этих значений расходов, используя формулу (11), определяются оптимальные диаметры.

Таблица 6. Построение надежного графа

Table 6. Building a robust graph

Номер участка	Участок	Идеальный участок	1	2	3	5	7	8	10	12	Q_{max}	$Q_{ср.}$
			1→2	2→3	1→4	2→5	3→6	4→7	5→8	6→9		
1	1→2	52,5		52,5	52,5	15	52,5	15	45	52,5	52,5	37,5
2	2→3	30	0		30	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	30	10,8
3	1→4	22,5	7,5	22,5		52,5	22,5	60	22,5	22,5	60	25,8
4	4→5	0	52,5	0	7,5	22,5	0	52,5	0	0	52,5	15
5	2→5	15	7,5	45	30		45	45	30	37,5	45	28,3
6	5→6	0	30	30	0	22,5	22,5	22,5	22,5	7,5	30	17,5
7	3→6	22,5	7,5	7,5	22,5	0		0	0	0	22,5	6,7
8	4→7	15	15	15	0	7,5	15		22,5	37,5	37,5	14,2
9	7→8	0	0	0	15	0	0	15	7,5	22,5	22,5	6,7
10	5→8	7,5	7,5	7,5	22,5	7,5	7,5	22,5		22,5	22,5	11,7
11	8→9	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	1,7
12	6→9	15	15	15	15	15	15	15	15		15	13,3

Для резервных участков рационально для подбора диаметров трубопроводов использовать средние значения расхода, а для основных участков их максимальные значения расходов. С помощью методики [19, 20] был рассчитан диаметр труб водоснабжения для г. Москвы на 100 лет (время жизненного цикла по ГОСТ Р 58785–2019):

$$d_{100} = \sqrt{\frac{4x}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4x}{3,14 \cdot 16x^{0,52}}} = \sqrt{0,8x^{0,48}} = 0,89x^{0,24} \quad (23)$$

С учетом ставки дисконтирования в 21 %, срок аккумулирования эксплуатационных затрат будет 4,76 лет, тогда для подбора диаметра необходимо будет воспользоваться следующей формулой:

$$d_{4,76} = \sqrt{\frac{4x}{3,14 \cdot 2,48x^{0,52}}} = \sqrt{0,51x^{0,48}} = 0,713x^{0,24} [\text{мм}] \quad (24)$$

Итоги расчетов сведены в табл. 7.

Таблица 7. Подбор диаметров для заданной системы водоснабжения

Table 7. Selection of diameters for a given water supply system

Номер участка		Расход Q_i [м³/ч]	Расход Q_i [м³/с]	Расчетный диаметр d_p [м]
1	1→2	52,5	0,015	0,26
2	2→3	30	0,008	0,22
3	1→4	60	0,017	0,27
4	4→5	15	0,004	0,24
5	2→5	45	0,0125	0,19
6	5→6	17,5	0,005	0,2
7	3→6	22,5	0,006	0,21
8	4→7	37,5	0,01	0,24
9	7→8	6,7	0,002	0,16
10	5→8	22,5	0,006	0,21
11	8→9	1,7	0,0005	0,12
12	6→9	15	0,004	0,2

Применительно к условиям г. Москвы получены следующие параметры водопроводной сети, которые представлены в табл. 8.

Таблица 8. Расчет капиталовложений по трубопроводам водоснабжения применительно к условиям г. Москвы

Table 8. Calculation of capital investments in water supply pipelines in relation to the conditions of Moscow

Номер участка	Расчетный диаметр d_p (м)	Протяженность участка (км)	Диаметр SDR17 (мм)	Стоимость за 1 км, тыс. руб.	Глубина, м	Группа грунтов	Суммарная стоимость	
1	1→2	0,26	0,12	280	7049,66	2	1–3	845,96
2	2→3	0,22	0,15	225	5537,8	2	1–3	830,67
3	1→4	0,27	0,13	280	7049,66	2	1–3	916,46
4	4→5	0,24	0,14	250	6175,98	2	1–3	864,64
5	2→5	0,19	0,14	200	5537,8	2	1–3	775,29
6	5→6	0,2	0,12	200	5537,8	2	1–3	664,54
7	3→6	0,21	0,15	225	6175,98	2	1–3	926,4
8	4→7	0,24	0,15	250	6175,98	2	1–3	926,4
9	7→8	0,16	0,15	160	5537,8	2	1–3	830,67
10	5→8	0,21	0,13	225	6175,98	2	1–3	802,88
11	8→9	0,12	0,17	125	4797,3	2	1–3	815,54
12	6→9	0,2	0,1	200	5537,8	2	1–3	553,78
Итого:								9753,23
Итого с учетом НДС 20 %								11 703,88

Таким образом, в процессе проектирования новой или развиваемой системы водоснабжения необходимо заглядывать в будущие периоды ее эксплуатации и оценивать стоимость всего жизненного цикла и учитывать прогнозы по новым материалам, стоимости электроэнергии, вариативности нагрузок потребления воды, изменчивости ставок дисконтирования затрат, неопределенности численности населения и др. факторов.

Создаваемая система водоснабжения должна быть гибкой, управляемой и способной с минимальными затратами адаптироваться к меняющимся социальным и экономическим условиям ее эксплуатации.

Решения такой сложной и комплексной задачи требует цифровизации и создания цифровых двойников системы, использования современных методов оптимизации, искусственного интеллекта, теории нечетких множеств и принятия решения, что и является предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Обоснование и оптимизацию перспективных схем развития систем водоснабжения следует производить на основе стоимости их жизненного цикла.
2. Расчетное время жизненного цикла следует назначать исходя из прогнозных значений ставок дисконтирования затрат.
3. Для оценки и решения схемно-структурных задач оптимизации систем водоснабжения предлагается методика, основанная на потоковых моделях и построении оптимального графа резервирования кольцевых сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин В.Р. Современное состояние, перспективы и пути развития систем водоснабжения и водоотведения, методы их расчета, построения и организации эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 359–368. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-359-368>. EDN: BYRIND.
2. Чупин В.Р., Бобер А.А. Разработка методического обеспечения для формирования перспективных схем систем водоснабжения и водоотведения малонаселенных территорий // Инвестиции. Строительство. Недвижимость: новые технологии и целевые приоритеты развития – 2023. Материалы V Международной научно-практической конференции (г. Иркутск, 27 апреля 2023 г.). Иркутск, 2023. С. 461–466. EDN: QYPNTV.
3. Майзель И.В., Бобер В.А. Интенсификация работы систем водоснабжения и водоотведения г. Нижнеудинска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4. С. 578–587. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-578-587>. EDN: ECAUGA.
4. Чупин В.Р., Душин А.С. Оптимизация параметров новых и реконструируемых систем подачи и распределения воды с учетом бесперебойного водоснабжения потребителей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 4. С. 790–803. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-790-803>. EDN: VEGFIC.
5. Чупин В.Р., Фам Н.В., Чупин Р.В. Оптимизация структуры и параметров районных систем водоснабжения с учетом трубопроводного и автомобильного транспорта воды // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 2. С. 42–57. EDN: ZXTYMX.
6. Пешков В.В., Бобер В.А., Шлепнев О.К. Учет неопределенности водопотребления при оптимизации перспективных схем развития систем водоснабжения и водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 446–451. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-446-451>. EDN: EIKRUB.
7. Чупин В.Р., Абросимова И.А. Обоснование параметров стоимости жизненного цикла строительства и эксплуатации систем водоснабжения // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. Материалы III Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 23–25 октября 2024 г.). Красноярск, 2024. С. 608–611. EDN: HRHQBF.
8. Чупин В.Р. Управление развитием систем водоснабжения и водоотведения в условиях вариативности численности населения и перспективного водопотребления // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 12. С. 41–57. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-756-12-41-57>. EDN: QTFALU.
9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / пер. с англ. Э.В. Вершкова, В.И. Коновальцева. М: Мир, 1978. 432 с.
10. Арутюнова Н.К., Мубаракوف Р.Р. Разработка веб-системы для обучения решению задач теории графов по теме «транспортные сети» // Цифровые инструменты в образовании. Сб. статей по материалам Всеросс. науч.-транспорт. конф. с междунар. участием (г. Сургут, 06–07 апреля 2023 г.). Сургут, 2023. С. 22–25. EDN: CYZJMR.
11. Чупин В.Р., Душин А.С. Оценка и повышение эксплуатационной надежности системы подачи и распределения воды в микрорайоне Иркутск-II г. Иркутска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 1. С. 112–125. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-112-125>. EDN: XGWGEI.
12. Чупин Р.В., Мороз М.В., Бобер В.А. Обоснование диаметров трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
13. Чупин В.Р. Управление развитием систем водоснабжения и водоотведения в условиях вариативности численности населения и перспективного водопотребления // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 12. С. 41–57. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-756-12-41-57>. EDN: QTFALU.
14. Шлафман В.В. Проектирование под заданную ценность или достижимая эффективность технических решений – что это? М.: Издательский дом ВСТ, 2024. 208 с.

15. Чупин В.Р., Мартыанов В.И., Матвеева М.В. Оптимизация параметров систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-104-113>. EDN: RGVOZN.
16. Чупин В.Р., Мороз М.В., Чупин В.Р. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения в условиях нечетких значений перспективного водопотребления и численности населения // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 11. С. 16–25. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.11.02>. EDN: XXZIEA.
17. Чупин В.Р., Пешков В.В. Выбор параметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 г. М.: Изд-во АВС, 2022. Т. 2. С. 469–479. EDN: JLEBFC.
18. Чупин В.Р., Бобер В.А. Оптимизация структуры и параметров напорно-безнапорных трубопроводных систем // Автоматизация и информатизация ТЭЦ. 2023. № 12. С. 65–69. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12\(605\)-65-69](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12(605)-65-69). EDN: KELZRE.
19. Душин А.С. Оценка надежности снабжения водой потребителей с учетом сезонных изменений условий функционирования системы подачи и распределения воды // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 624–637. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-624-637>. EDN: KEKFZH.
20. Душин А.С. Оценка адекватности модели вероятностных отборов воды и распределения потоков реальным процессам, происходящим в системах подачи и распределения воды // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1. С. 40–51. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-40-51>. EDN: DLWKPKQ.

REFERENCES

1. Chupin V.R. Current State and Prospects of Water Supply and Sanitation Systems, Methods for their Calculation, Design, and Operation. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):359-368. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-359-368>. EDN: BYRIND.
2. Chupin V.R., Beaver A.A. Development of Methodological Support for The Formation of Promising Schemes for Water Supply and Sanitation Systems in Sparsely Populated Areas. In: *Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost': novye tekhnologii i tselevye priority razvitiya – 2023. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Investments. Construction. Real Estate: New Technologies and Target Development Priorities – 2023. Proceedings of The V International Scientific and Practical Conference*. 27 April 2023, Irkutsk. Irkutsk; 2023. P. 461–466. (In Russ.). EDN: QYPNTV.
3. Maizel I.V., Bober V.A. Intensification of Water Supply and Sanitation Systems in The City of Nizhneudinsk. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(4):578-587. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-578-587>. EDN: ECAUGA.
4. Chupin V.R., Dushin A.S. Parameter Optimisation for New and Reconstructed Systems of Water Supply and Distribution for Ensuring Consumer's Uninterrupted Water Supply. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(4):790-803. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-790-803>. EDN: VEGFIC.
5. Chupin V.R., Fam N.M., Chupin R.V. Optimization of The Structure and Parameters of District Water Supply Systems Taking into Account Pipeline and Automobile Transport. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;2:42-57. (In Russ.). EDN: ZXTYMX.
6. Peshkov V.V., Bober V.A., Shlepnev O.K. Addressing Uncertainty in Water Consumption When Optimising Promising Water Supply and Disposal Schemes. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):446-451. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-446-451>. EDN: EIKRUB.
7. Chupin V.R., Abrosimova I.A. Justification of The Parameters of the Life Cycle Cost of Construction and Operation of Water Supply Systems. In: *Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzgljad v budushhee. Materialy III Vserossiiskoj nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current Issues in Construction: A Look into The Future. Proceedings of The III All-Russian Scientific and Practical Conference*. 23–25 October 2024, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2024. P. 608–611. (In Russ.). EDN: HRHQBF.
8. Chupin V.R. Management of The Development of Water Supply and Sanitation Systems in The Context of Population Variability and Prospective Water Consumption. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021;12:41-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-756-12-41-57>. EDN: QTFALU.
9. Kristofides N. Graph Theory. An Algorithmic Approach, 1978, 432 (Russ. ed.: *Teoriya grafov. Algoritmicheskii podkhod*. Moscow: Mir, 1978. 432 p.).
10. Arutyunova N.K., Mubarakov R.R. Development of A Web System for Teaching Solving Graph Theory Problems On the Topic of “Transport Networks”. In: *Tsifrovye instrumenty v obrazovanii. Sbornik statei po materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Digital Tools in*

- Education. Collection of Articles Based On the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation.* 06–07 April 2023, Surgut. Surgut; 2023. P. 22–25. (In Russ.). EDN: CYZJMR.
11. Chupin V.R., Dushin A.S. Assessment and Improvement of the Operational Reliability of the Water Supply and Distribution System in The Irkutsk-II Microdistrict of the Irkutsk City. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2021;11(1):112-125. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-112-125>. EDN: XGWGEI.
12. Chupin R.V., Moroz M.V., Bober V.A. Substantiation of The Diameters of Pipelines of Water Supply and Wastewater Disposal Systems Based On Minimizing the Costs of Their Life Cycle. *Water Supply and Sanitary Technique.* 2022;4:52-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
13. Chupin V.R. Management of The Development of Water Supply and Sanitation Systems in The Context of Population Variability and Prospective Water Consumption. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2021;12:41-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-756-12-41-57>. EDN: QTALU.
14. Shlafman V.V. *Design for A Given Value or Achievable Efficiency of Technical Solutions – What Is It?* Moscow: VST Publishing House, 2024. 208 p. (In Russ.).
15. Chupin V.R., Mart'yanov V.I., Matveeva M.V. Optimization of Systems of Water Supply and Sewerage by Minimizing Their Life Cycle Costs. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(1):104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-104-113>. EDN: RGVOZN.
16. Chupin R.V., Moroz M.V., Chupin V.R. Designing Water Supply and Wastewater Disposal Systems in Conditions of Fuzzy Values of Prospective Water Consumption and Population Base. *Water Supply and Sanitary Technique.* 2022;11:16-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.11.02>. EDN: XXZIEA.
17. Chupin V.R., Peshkov V.V. Selection of Pipeline Parameters for Water Supply and Sanitation Systems Based On Minimization of Their Life Cycle Costs. In: *Fundamental, Exploratory and Applied Research of RAASN On Scientific Support for The Development of Architecture, Urban Planning and The Construction Industry of the Russian Federation in 2021.* Moscow: ABC Publishing House, 2022. Vol. 2. P. 469–479. (In Russ.). EDN: JLEBFC.
18. Chupin V.R., Bober V.A. Optimization of Structure and Parameters of Pressure-Free Flow Pipeline Systems. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex.* 2023;12:65-69. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12\(605\)-65-69](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12(605)-65-69). EDN: KELZRE.
19. Dushin A.S. Assessment of Reliability of Supplying Water to Consumers Given the Seasonal Changes in Operating Conditions of Water Transmission and Distribution Network. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2021;11(4):624-637. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-624-637>. EDN: KEKFZH.
20. Dushin A.S. Assessment of The Adequacy of Probabilistic Water Sampling and Flow Distribution Model to The Real Processes in The Water Supply and Distribution Systems. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(1):40-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-40-51>. EDN: DLWKPK.

Информация об авторах

Абросимова Иванна Александровна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: abrosimovaia94@gmail.com

Бобер Виктор Антонович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
✉ e-mail: viktorbober200400@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8340-6222>
Author ID: 504512

Information about the authors

Ivanna A. Abrosimova,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: abrosimovaia94@gmail.com

Viktor A. Bober,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
✉ e-mail: viktorbober200400@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8340-6222>
Author ID: 504512

Ярыгин Роман Николаевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: yarygin.r@hydrig.ru

Roman N. Yarygin,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: yarygin.r@hydrig.ru

Баярсайхан Мэндбаяр,
исследователь,
лаборатория энергетических исследований,
Физико-технический институт
Монгольской академии наук,
210651, г. Улан-Батор, ул. Энхтайван, 54Б, Мон-
голия,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: mendbayarb@mas.ac.mn
<https://orcid.org/0009-0000-7930-7512>

Bayarsaikhan Mendbayar,
Researcher,
Energy Research Laboratory,
Institute of Physics and Technology
Mongolian Academy of Sciences,
54B Enkhtaivan St., Ulaanbaatar 210651,
Mongolia,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia
e-mail: mendbayarb@mas.ac.mn
<https://orcid.org/0009-0000-7930-7512>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.02.2025.
Одобрена после рецензирования 11.03.2025.
Принята к публикации 12.03.2025.

Information about the article

The article was submitted 26.02.2025.
Approved after reviewing 11.03.2025.
Accepted for publication 12.03.2025.