



Оптимизация параметров систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла

© Виктор Романович Чупин, Владимир Иванович Мартьянов,
Мария Витальевна Матвеева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Чупин Виктор Романович, chupinvr@ex.istu.edu

Аннотация. При проектировании городских систем водоснабжения и водоотведения требуется обосновать диаметры трубопроводов, скорости движения воды и стоков. Существующие подходы и нормативные требования, изложенные в СП 31.13330.2012, основываются в том числе на экономических факторах, вычисляемых на основе приведенных затрат на строительство и эксплуатацию систем водоснабжения и водоотведения. Вместе с тем, согласно ГОСТ Р 587885-2019, выбор проектного варианта следует осуществлять на основе затрат их жизненного цикла. В связи с этим предлагается методика вычисления оптимальных значений диаметров и скоростей движения воды и сточной жидкости в трубопроводах на основе затрат их жизненного цикла. В исследовании конкретизируются затраты жизненного цикла в трубопроводных системах водоснабжения и водоотведения в виде функций расхода и скорости транспортируемых воды и стоков. Берется первая производная затрат жизненного цикла по скорости, и полученное уравнение приравнивается нулю. Далее уравнение разрешается относительно скорости. В итоге получены формулы для вычисления оптимальных значений скоростей движения воды и сточной жидкости в трубопроводах относительно затрат их жизненного цикла. Проведенные численные эксперименты показали, что оптимальные значения скоростей движения воды и сточной жидкости зависят от величин расхода, стоимости электроэнергии и количества лет жизненного цикла систем водоснабжения и водоотведения. Предлагается внести изменения в приложение «В» СП 31.13330.2012, добавив обоснование диаметров трубопроводов на основе затрат жизненного цикла систем водоснабжения и водоотведения.

Ключевые слова: системы водоснабжения и водоотведения, минимизация затрат жизненного цикла, оптимальные скорости и диаметры трубопроводов

Для цитирования: Чупин В. Р., Мартьянов 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>.

Original article

Optimization of systems of water supply and sewerage by minimizing their life cycle costs

Viktor R. Chupin, Vladimir I. Mart'yanov, Maria V. Matveeva

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Viktor R. Chupin, chupinvr@ex.istu.edu

Abstract. When designing urban water supply and sewerage systems, the substantiation of pipeline diameters and velocities of the fresh and sewage water should be carried out. The existing approaches and regulatory requirements provided in SP 31.13330.2012 consider economic factors in terms of reduced costs for the construction and operation of water supply and sewerage systems. However, according to GOST R 587885-2019, the design option should be selected on the basis of its life cycle costs (LLC). In this regard, an LLC-based methodology for calculating the optimal values of pipeline diameters and velocities of the fresh and sewage water in pipelines is proposed. The study specifies the LLC of pipeline water supply and sewerage systems in the form of the flow rate and velocity functions of

the transported fresh and sewage water. The first LLC derivative in terms of velocity is taken and set equal to zero. Further, the equation is solved relative to the velocity. As a result, formulas for calculating optimal pipeline velocity values for the fresh and sewage water relative to their LLC are obtained. The conducted numerical experiments demonstrate that the optimal values of fresh and sewage water velocities depend on the values of flow rate and electricity cost, as well as the number of years in the life cycle of water supply and sewerage systems. It is proposed to amend Appendix B of SP 31.13330.2012 by adding a substantiation of pipeline diameters based on the LLC of water supply and sewerage systems.

Keywords: water supply and sanitation systems, minimization of life cycle costs, optimal speeds and diameters of pipelines

For citation: Chupin V. R., Mart'yanov V. I., Matveeva M. V. Optimization of systems of water supply and sewerage by minimizing their life cycle costs. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = 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>.

Введение

Основным способом доставки воды и тепла потребителям, а также отведения от них сточных, дождевых и дренажных вод являются трубопроводные системы в виде насосных станций и труб, отличающихся материалом, сечением и толщиной стенок. Основными и капиталоемкими являются трубопроводы, для которых значения диаметров, толщина стенок и материал труб определяются величинами транспортируемого потока и его гидравлическими параметрами (напорным и безнапорным режимом движения), а также скоростью перемещения потока жидкости. Из уравнения неразрывности в напорных трубопроводах цилиндрической формы следует¹:

$$x = w \cdot v, \quad d = \sqrt{\frac{4x}{\pi v}}, \quad (1)$$

где w – площадь живого сечения, м²; v – скорость, м/с; x – расход воды в трубопроводном участке сети, м³/с. Согласно формуле (1), для определения диаметра трубопровода необходимо знание расхода транспортируемой жидкости и скорости ее движения. Как правило, расход является известной величиной, а при назначении скорости движения жидкости возникает ряд вопросов, на которые затрудняются ответить даже опытные проектировщики. Скорость – это физическая величина, которая обеспечивает перемещение определенного объема жидкости и при определенных численных значениях способствует переносу в

ней различных взвешенных веществ, в том числе передает тепло от источника к потребителям. Впрочем, в напорном трубопроводе давление распространяется со скоростью звука в транспортируемой среде, что практически мгновенно обеспечивает потребности потребителей, например, в воде. При безнапорном движении весь процесс транспортирования жидкости определяется ее скоростью и временем добега до расчетных сечений, как это происходит, в частности, в ливневой канализации. Поэтому и возникают вопросы определения и назначения скоростей движения в зависимости от различных видов жидкостей и режимов их транспортирования.

В СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения», СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» приводятся лишь рекомендательные значения скоростей для всасывающих и напорных трубопроводов в диапазоне от 0,6 до 4 м/с, и нет упоминаний об экономически обоснованных диаметрах и скоростях движения жидкостей. Заметим, что в 80-е годы прошлого столетия на основе минимизации приведенных затрат Н. Н. Абрамовым² [1] был предложен экономический фактор для назначения оптимальных диаметров систем водоснабжения, а на основе экспериментальных исследований, проведенных в институте «ВНИИ ВОДГЕО», разработаны методические рекомендации (таблицы Ф. Ф. Шевелева³), которыми и сейчас пользуются проектировщики. Вместе с тем за прошедшие годы появились трубы из

¹Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

²Абрамов Н. Н. Расчет водопроводных сетей: учеб. пособ. для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 278 с.

³Шевелёв Ф. А., Шевелёв А. Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособ. М.: Стройиздат, 1984. 116 с.;

Журба М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: учеб. пособ.: в 3 т. М.: Издательство «СВ», 2004. Т. 1. 744 с.

новых и более долговечных материалов, изменились экономические условия их применения и принят новый ГОСТ Р 587885-2019 «Качество воды. Оценка стоимости жизненного цикла для эффективной работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» [2], согласно которому в основе проектирования коммунальных систем водоснабжения и водоотведения принимаются затраты жизненного цикла (ЗЖЦ). В связи с этим возникает необходимость корректировки сложившейся методологии обоснования диаметров трубопроводов, уже на основании ЗЖЦ.

Методы

Многие годы в эпоху социализма, в постперестроечный период и сейчас применяется критерий приведенных расчетных затрат, в котором за счет нормативного срока окупаемости (например, 8 лет) и эффективности капиталовложений (обратная величина сроку окупаемости) балансировались единовременные капиталовложения и издержки (годовые эксплуатационные затраты). Позднее нормативный срок окупаемости (нормативный срок эффективности капиталовложений) стал отождествляться с банковскими процентами. При этом критерий сопоставления вариантов оставался прежним, и он, в основном, был направлен на минимизацию единовременных капиталовложений при неизменных эксплуатационных затратах. Однако эксплуатационные затраты в системах водоснабжения и водоотведения за жизненный цикл (например, за 50 лет) в двадцать, тридцать раз больше единовременных капиталовложений. Поэтому большинство построенных и эксплуатируемых систем водоснабжения и водоотведения имеют значительные эксплуатационные затраты (на электроэнергию, ремонты, обслуживание и содержание оборудования) [2–6]. Сам критерий приведенных затрат практически не стимулировал минимизацию эксплуатационных затрат за счет внедрения новых технологий автоматизации, диспетчеризации и тем более цифровизации. Эффективным в этом отношении является критерий стоимости жизненного цикла системы, который уже давно применяется в зарубежных странах [7–11] и в котором учитываются все капиталовложения (как единовременные, так и затраты на капитальные и текущие ремонты, на развитие и консервацию системы) и все эксплуатационные затраты, включая затраты на новые технологии, автоматизацию, интеллектуализацию и управление системами.

Такой критерий в ГОСТ Р 587885-2019 представлен в следующем виде⁴:

$$\text{ЗЖЦ} = \sum_{t=t_1}^T \left(\frac{K_t^e}{(1+r)^t} \right) + \sum_{t=t_2}^T \left(\frac{C_t^{\text{экс}}}{(1+r)^t} \right) + C_d^y, \quad (2)$$

где K_t^e – капиталовложения в объекты водоснабжения и водоотведения по периодам строительства, капитального ремонта и реконструкции, начиная с момента времени t_1 ; $C_t^{\text{экс}}$ – ежегодные эксплуатационные затраты по трубопроводам, насосным станциям и другим сооружениям, начиная с периода времени t_2 , когда системы начинают функционировать; C_d^y – затраты на разборку и утилизацию отслужившего свой срок оборудования; T – время жизненного цикла (как правило, принимается временной интервал, соответствующий оборудованию с наибольшим сроком службы); r – норма дисконта (величина ставки рефинансирования ЦБ РФ, например, для безрисковых проектов она составляет 4 %), играет роль базового уровня, в сравнении с которым оценивается экономическая эффективность варианта проекта.

Следует отметить, что для оборудования с меньшим сроком службы единовременные капиталовложения увеличиваются на коэффициент кратности по отношению к оборудованию с наибольшим сроком службы. Например, при жизненном цикле 50 лет и сроке службы автомобиля 8 лет его придется менять 6,26 раз. То же относится и к другим элементам сложной технической системы. С учетом коэффициента кратности капиталовложений ЗЖЦ запишем следующим образом:

$$\text{ЗЖЦ} = R_1^0 \cdot T_1^0 \cdot \sum_{i=1}^n K_i^y \cdot K P_i^y + R_2^0 \cdot T_2^0 \cdot \sum_{i=1}^n (C_i^{\text{экс}} + C_i^{\text{abr}}), \quad (3)$$

где $R_1^0 = \sum_{t=t_1}^T \left(\frac{1}{(1+r)^t} \right)$, $R_2^0 = \sum_{t=t_2}^T \left(\frac{1}{(1+r)^t} \right)$, R_1^0 , R_2^0 – коэффициенты дисконтирования капиталовложений и эксплуатационных затрат (например, для 50 лет коэффициенты дисконтирования составляют 0,141); T_1^0 – срок службы основного фонда систем водоснабжения и водоотведения; n – количество расчетных участков системы водоотведения ($i = 1, \dots, n$); K_i^y – капиталовложения, равные единовременным затратам по каждому участку сети; $K P_i^y$ – коэффициент кратности капиталовложений (равный отношению расчетного срока службы системы к сроку службы конкретного элемента системы, чей срок жизни меньше расчетного); T_2^0 – интервал времени в годах, на котором определяются эксплуатационные затраты; $C_i^{\text{экс}}$ – текущие годовые эксплуатационные затраты по участку сети i ; C_i^{abr} – затраты на ликвидацию аварийных ситуаций.

⁴ГОСТ Р 587885-2019. Качество воды. Оценка стоимости жизненного цикла для эффективной работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения. М.: Стандартинформ, 2020. 36 с.

Для конкретизации (3) воспользуемся укрупненными показателями по капиталовложениям в трубопроводы НЦС-81-02-14-2020 «Наружные сети водоснабжения и канализации» и НЦС-81-02-19-2020 «Здания и сооружения городской инфраструктуры» и по годовым эксплуатационным затратам $C_2^{\text{экс}}$ (тыс. руб./год), рассчитываемым на основе Приказа Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 23 марта 2020 г. № 154/пр «Об утверждении Типовых отраслевых норм численности работников водопроводно-канализационного хозяйства». Для каждого участка сети i на основе капиталовложений K_i^y и эксплуатационных затрат $C_i^{\text{экс}}$ выразим затраты жизненного цикла (2)–(3) в виде их зависимости от расхода транспортируемых сточных вод x_i и скорости движения потока v_i . Далее, возьмем частную производную затрат жизненного цикла по скорости и приравняем полученное уравнение нулю. Из уравнения найдем значение оптимальной скорости.

Исследования выполним для полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR 17 с (район строительства – Иркутская область).

Затраты на эксплуатацию систем водоснабжения $\mathcal{E}_3^{\text{экс}}$ (тыс. руб./год) определяются следующим образом [5]:

$\mathcal{E}_3 = C_{\text{ам}} + C_{\text{к.р}} + C_{\text{т.р}} + C_{\text{элк}} + C_{\text{фоп}} + C_{\text{св}} + C_{\text{н.в}} + C_{\text{пр}}$, (4)
где $C_{\text{ам}}$ – амортизационные отчисления (принимается $0,05 \cdot K$ по трубопроводам); $C_{\text{к.р}}$ – затраты на капитальный ремонт ($0,046 \cdot K$), руб./год; $C_{\text{т.р}}$ – затраты на текущий ремонт ($0,01 \cdot K$), руб./год; $C_{\text{элк}}$ – стоимость электроэнергии, тыс. руб./год:

$$C_{\text{элк}} = 108 \cdot z_{\text{элк}} \cdot H \cdot x, \quad (5)$$

где $z_{\text{элк}}$ – единичная стоимость электроэнергии (руб. за кВт·час); x – расход транспортируемой воды, м³/с; H – напор насосной станции, м вод. ст.

Фонд оплаты труда и страховые взносы составляют:

$$C_{\text{фоп}} = 1,5 \cdot 12 \cdot 3П_{\text{ср}} \cdot Ч_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где $3П_{\text{ср}}$ – средняя заработная плата в месяц по предприятию, тыс. руб.; $Ч_{\text{ср}}$ – средняя численность работников предприятия, обслуживающих системы водоснабжения и водоотведения, для водопроводных сетей (контроль, обслуживание, ремонт) составляет:

$$Ч_{\text{ср}} = 0,45 \cdot L_i^{0,83}.$$

$C_{\text{св}}$ – страховые взносы ($0,30 \cdot C_{\text{фоп}}$), в том числе в Пенсионный фонд ($0,22 \cdot C_{\text{фоп}}$), Фонд социального страхования ($0,029 \cdot C_{\text{фоп}}$) и Фонд медицинского страхования ($0,051 \cdot C_{\text{фоп}}$); взносы за травматизм и 13 % НДФЛ.

$C_{\text{н.в}}$ – налог на воду (тыс. руб./год), определяется следующим образом:

$$C_{\text{н.в}} = 31536 \cdot C_{\text{н.см}} \cdot x, \quad (7)$$

где $C_{\text{н.см}}$ – налоговая ставка в рублях за 1 м³ воды, забираемой из поверхностных и подземных источников (в г. Иркутске в 2020 г. эта ставка составляла 0,162 рублей за 1 м³).

$C_{\text{пр}}$ – прочие расходы, тыс. руб./год, принимаются в размере 20 % от суммы амортизационных отчислений ($C_{\text{ам}}$) и затрат на заработную плату обслуживающего персонала ($C_{\text{фоп}}$):

$$C_{\text{пр}} = 0,2 \cdot (C_{\text{ам}} + C_{\text{фоп}}). \quad (8)$$

С учетом выражений (5)–(8) эксплуатационные затраты можно представить следующим образом:

$$\mathcal{E}_{3i} = 0,116 \cdot K_i + C_{\text{эл}} + 5108,83 \cdot x_i + 8,1 \cdot L_i^{0,83} \cdot 3П_{\text{ср}}, \quad (9)$$

где x_i – расход транспортируемой воды в м³/сек.

Результаты и их обсуждение

Для конкретизации единовременных (капитальных) затрат воспользуемся информацией, приведенной в укрупненных нормативах цен строительства НЦС 81-02-14-2020 для полиэтиленовых труб марок ПЭ 100 SDR 17 и ПЭ 100 RC SDR 17 с защитным покрытием. Капиталовложения в полиэтиленовые трубы хорошо (с достоверностью 0,99) аппроксимируются функцией вида:

$$K = (a \cdot d^2 + b \cdot d + c) \cdot L, \quad (10)$$

где K измеряется в тыс. руб., L – в км.

Коэффициенты аппроксимации представлены в табл. 1.

С учетом формулы (1):

$$K = (A \cdot x \cdot v^{-1} + B \cdot x^{0,5} \cdot v^{-0,5} + C) \cdot L. \quad (11)$$

Коэффициенты аппроксимации для уравнения (11) указаны в табл. 2.

Гидравлический расчет напорных трубопроводов систем водоснабжения из пластмассовых труб, согласно СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения», осуществляется по формуле:

$$h_i = 1,1 \cdot Y_i \cdot L_i; \quad Y_i = 0,001052 \cdot \frac{x_i^{1,774}}{d_i^{4,774}}, \quad (12)$$

где Y_i – гидравлический уклон; L_i – длина участка сети, м; x_i – расход, м³/с.

Согласно теории гидравлических цепей [12] и ее основному закону «Вся привносимая в трубопроводную систему энергия ($H_i \cdot x_i$) тратится на преодоление сил трения ($h_i \cdot x_i$), за вычетом энергии на излив ($p_i \cdot x_i$)»:

$$H_i \cdot x_i = h_i \cdot x_i + p_i \cdot x_i = 0,0011572 \cdot L_i \cdot \frac{x_i^{1,774}}{d_i^{4,774}} + p_i \cdot x_i, \quad (13)$$

где p_i – пьезометрический напор в конце трубопровода, м.

С учетом (1):

$$h_i \cdot x_i = 0,0 v_i = \frac{5,6 \cdot x_i^{0,52}}{z^{0,287} \cdot T^{0,144}} 00649 \cdot L_i \cdot x_i^{-0,613} \cdot v_i^{2,387} + p_i \cdot x_i. \quad (14)$$

Таблица 1. Значения коэффициентов аппроксимации в формуле (10)

Table 1. The values of the approximation coefficients in formula (10)

Коэффициенты	Трубы ПЭ 100 SDR 17				Трубы ПЭ 100 SDR 17 с защитным покрытием			
	Разработка сухого грунта в отвал, без креплений		Разработка мокрого грунта в отвал, без креплений		Разработка сухого грунта в отвал, без креплений		Разработка мокрого грунта в отвал, без креплений	
	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4
a	50246	51356	50939	52826	55379	56489	56072	57957
b	–10277	–8459,5	–9484,7	–8385,3	12460	6204,5	13252	14352
c	5363,6	6091,1	6091,1	8344	3224,2	3951,7	5220,7	6204,5

Примечание. Глубина заложения труб – 3 м.

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимации в формуле (11)

Table 2. The values of the approximation coefficients in formula (11)

Коэффициенты	Трубы ПЭ 100 SDR 17				Трубы ПЭ 100 SDR 17 с защитным покрытием			
	Разработка сухого грунта в отвал, без креплений		Разработка мокрого грунта в отвал, без креплений		Разработка сухого грунта в отвал, без креплений		Разработка мокрого грунта в отвал, без креплений	
	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4	Группы грунтов 1–3	Группа грунтов 4
A	63975,2	65388,5	64857,6	67260,21	70510,7	71924,0	71393,1	73795,7
B	–11596	–9545,53	–10702	–9461,8	–14059,6	–16109,8	–14953	16193,3
C	5363,6	6091,1	7360,2	8344	3224,2	3951,7	5220,7	6204,5

Примечание. Глубина заложения труб – 3 м.

Таким образом, затраты электроэнергии можно представить как функцию расхода, скорости движения воды, длины трубопровода, остаточного напора в конце трубопровода и удельных затрат электроэнергии:

$$C_{элк} = 108 \cdot z_{элк} \cdot (0.649 \cdot L_i \cdot x_i^{-0.613} \cdot v_i^{2.387} + p_i \cdot x_i). \quad (15)$$

Единица измерения L – км.

В результате проведенных преобразований ЗЖЦ можно представить формулами (3), (9), (11) и (13) в виде зависимостей от расхода и скорости транспортируемой воды, времени жизненного цикла, длины трубопровода и др.

Для определения оптимальных значений скорости движения воды были проведены следующие численные эксперименты. Рассматривался интервал изменения скоростей движения воды от 0,1 м/с до 10 м/с с шагом 0,1, и вычислялись ЗЖЦ.

В качестве искомых скоростей принимались те, которым соответствовали минимальные значения затрат жизненного цикла, что равносильно взятию первой производной по скорости движения воды.

В итоге исследовано влияние величин расхода транспортируемой воды, стоимости электроэнергии, периода жизненного цикла, протяженности трубопровода и его аварийности на оптимальную скорость движения воды. Некоторые результаты представлены в табл. 3–5.

После обработки результатов численных экспериментов и проведенных исследований получена следующая формула для вычисления оптимальных скоростей в системах водоснабжения:

$$v_i = \frac{5.6 \cdot x_i^{0.52}}{z^{0.287} \cdot T^{0.144}}, \quad (16)$$

где x – расход воды в трубопроводе, м³/с, z – стоимость электроэнергии, руб. за кВт·час, T – время жизненного цикла системы водоснабжения, лет.

Следует отметить, что в ходе проведенных численных экспериментов установлено, что протяженность трубопроводных участков, остаточный напор в конце участка и рельеф местности не влияют на значения оптимальных скоростей.

Таблица 3. Значения оптимальных скоростей движения воды для полиэтиленовых труб при жизненном цикле $T = 50$ лет, длине трубопровода 1 км

Table 3. Values of optimal water flow rates for polyethylene pipes with a life cycle of $T = 50$ years, a pipeline length of 1 km

Стоимость электроэнергии $Z_{элк}$, руб. за кВт·час	Оптимальная скорость движения, м/с					
	0,01	0,1	0,5	1	1,5	2
1	0,3	1	2,2	3,1	3,7	4,3
2	0,2	0,8	1,8	2,5	3	3,5
3		0,7	1,6	2,2	2,7	3,1
4			1,5	2	2,5	2,9
5			1,4	1,9	2,3	2,7
6		0,6	1,3	1,8	2,2	2,5
7			1,2	1,7	2,1	2,4
8			1,2	1,7	2	2,3
9		0,5	1,2	1,6	2	2,3
10			1,1	1,6	1,9	2,2

Таблица 4. Значения оптимальных скоростей движения воды для полиэтиленовых труб при жизненном цикле $T = 10$ лет, длине трубопровода 10 км

Table 4. Values of optimal water flow rates for polyethylene pipes with a life cycle of $T = 10$ years, a pipeline length of 10 km

Стоимость электроэнергии $Z_{элк}$, руб. за кВт·час	Оптимальная скорость движения, м/с					
	0,01	0,1	0,5	1	1,5	2
1	0,3	1,1	2,5	3,5	4,3	4,9
2		0,9	2	2,9	3,5	4
3		0,8	1,8	2,5	3,1	3,6
4	0,2	0,8	1,7	2,3	2,9	3,3
5		0,7	1,6	2,2	2,7	3,1
6		0,7	1,5	2,1	2,5	2,9
7		0,6	1,4	2	2,4	2,8
8			1,4	1,9	2,3	2,7
9			1,3	1,9	2,3	2,6
10			1,3	1,8	2,2	2,5

При $T = 10$ лет скорости движения воды, вычисленные по формуле (16), соответствуют экономическим скоростям, представленным в таблицах Ф. Ф. Шевелева⁵.

При увеличении стоимости электроэнергии с 1 руб. за кВт·час до 10 рублей оптимальная скорость уменьшается практически вдвое.

С увеличением срока жизненного цикла системы также уменьшается скорость движения воды.

Проведя аналогичные вычисления по уравнениям (2)–(15), не сложно получить формулы определения оптимальных скоро-

стей для напорных трубопроводов из чугуна, стали, железобетона.

В общем виде формулу вычисления оптимальной скорости движения воды и стоков можно представить следующим образом:

$$v_i = \frac{a \cdot x_i^b}{z^{c \cdot T^d}} \quad (17)$$

Коэффициенты формулы (17) представлены в табл. 6.

Учитывая выражение (1), можно перейти от скорости к диаметрам трубопроводов:

$$d = 0.478 \cdot x_i^{0.24} \cdot z_i^{0.143} \cdot T_i^{0.072} \quad (18)$$

⁵Шевелёв Ф. А., Шевелёв А. Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособ. М.: Стройиздат, 1984. 116 с.

Таблица 5. Значения оптимальных скоростей движения воды для полиэтиленовых труб при жизненном цикле $T = 1$ год, длине трубопровода 100 км

Table 5. Values of optimal water flow rates for polyethylene pipes with a life cycle $T = 1$ year, pipeline length 100 km

Стоимость электроэнергии $Z_{элк}$, руб. за кВт·час,	Оптимальная скорость движения, м/с					
	0,01	0,1	0,5	1	1,5	2
1	0,5	1,7	3,9	5,6	6,8	7,8
2	0,4	1,4	3,2	4,6	5,6	6,4
3		1,3	2,9	4,1	5	5,7
4		1,2	2,7	3,8	4,6	5,3
5	0,3	1,1	2,5	3,5	4,3	4,9
6		1,1	2,4	3,3	4,1	4,7
7		1	2,3	3,2	3,9	4,5
8		1	2,2	3,1	3,7	4,3
9		0,9	2,1	3	3,6	4,2
10		0,9	2,1	2,9	3,5	4

Таблица 6. Значения коэффициентов в формуле (17)

Table 6. Values of coefficients in formula (17)

Коэффициенты	Полиэтиленовые трубы		Чугунные трубы		Стальные трубы
	Водоснабжение	Канализация	Водоснабжение	Канализация	Водоснабжение
a	5,6	4,5	5,15	4,95	4,48
b	0,52	0,477	0,435	0,442	0,48
c	0,287	0,287	0,29	0,296	0,294
d	0,144	0,14	0,146	0,166	0,141

Используя формулу (17), для полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR 17 со сроком службы 100 лет для расхода воды 0,5 м³/с

можно получить различные значения теоретических диаметров (табл. 7).

Таблица 7. Значения оптимальных диаметров для различных регионов страны

Table 7. Values of optimal diameters for different regions of the country

Регион	Стоимость электроэнергии, руб./кВт·час	Диаметр, м		
		при $T = 10$ лет	при $T = 50$ лет	при $T = 100$ лет
Москва	5,15	0,518	0,685	0,713
Иркутск	1,23	0,492	0,553	0,580
Чукотка	10,14	0,666	0,748	0,810

Для полиэтиленовых труб со сроком службы 100 лет, согласно формуле (18), можно получить диапазоны расходов, м³/с, которым будут соответствовать диаметры из стандартного ряда, выпускаемого промышленностью, например, для г. Иркутска (табл. 8).

Аналогичные зависимости по формуле (17) получены и для напорной канализации из двух параллельных трубопроводов, коэффициенты приведены в табл. 9.

С учетом уравнения (18) формула (12) примет следующий вид:

$$h_i = 1,1 \cdot Y_i \cdot L_i; \quad Y_i = \frac{0,0035 \cdot x^{0,628}}{Z^{0,68} \cdot T^{0,34}}. \quad (19)$$

Описание систем водоснабжения и водоотведения совокупностью этих формул для каждого трубопровода является недостаточным, так как потокораспределение в целом подчиняется некоторым системным законам сохранения массы и энергии.

Таковыми законами являются аналоги первого и второго постулатов Кирхгофа. Для их формального описания используем алгебру гидравлических цепей [12].

Таблица 8. Диапазоны расходов воды и соответствующие им стандартные диаметры труб
Table 8. Water flow ranges and their corresponding standard pipe diameters

Диапазон расходов, м³/с	Диаметр, мм	Диапазон расходов, м³/с	Диаметр, мм	Диапазон расходов, м³/с	Диаметр, мм
<0,00014	100	0,014–0,026	350	0,5–0,83	800
0,00014–0,00036	125	0,026–0,046	400	0,83–1,35	900
0,00036–0,00077	150	0,046–0,12	500	1,35–2,1	1000
0,00077–0,0026	200	0,12–0,31	630	–	
0,0026–0,014	300	0,31–0,5	710		

Таблица 9. Значения коэффициентов аппроксимации в формуле (17)
Table 9. The values of the approximation coefficients in formula (17)

Коэффициенты	Полиэтиленовые трубы	Чугунные трубы
a	5,6	6
b	0,485	0,44
c	0,286	0,303
d	0,15	0,146

Чтобы учесть закон сохранения массы в системах водоснабжения и водоотведения, воспользуемся матрицей соединения узлов и ветвей схемы, размеры которой будут следующими: $A = \|a_{ji}\|_n^m$ (m, n – количество узлов и участков схемы).

Здесь $a_{ji} = -1$, если ветвь i направлена к узлу j ; $a_{ji} = 1$, если ветвь i исходит из j ; $a_{ji} = 0$, когда узел j не принадлежит ветви i .

Чтобы учесть закон сохранения энергии, воспользуемся матрицей контуров ($B = \|b_{ri}\|_n^c$, c – количество контуров), которая фиксирует совпадения выбранной базисной системы контуров и ветвей: $b_{ri} = 1$, если ветвь i входит в контур и ее ориентация совпадает с направлением контура; $b_{ri} = -1$, когда ориентация входящей в контур r ветви противоположна направлению обхода контура, и $b_{ri} = 0$, если ветвь не входит в контур.

В итоге получаем следующую систему линейных и нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} A \cdot x &= Q, \\ B \cdot h &= 0, \\ P &= e \cdot P_j^* - R_g \cdot h. \end{aligned} \quad (20)$$

Решение системы уравнений (20), включая замыкающее соотношение (19), позволяет определить оптимальные параметры си-

стем водоснабжения разветвленной и кольцевой структуры.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что знание скоростей движения воды и сточной жидкости обеспечивает возможность обосновать диаметры трубопроводов новых и реконструируемых систем водоснабжения и водоотведения.

По итогам исследования предлагается:

1. Использовать методику вычисления скорости движения воды и стоков на основании минимизации затрат жизненного цикла систем водоснабжения и водоотведения.

2. Полученные формулы вычисления скоростей движения воды и стоков использовать при проектировании систем водоснабжения и водоотведения из полиэтиленовых труб.

3. Внести изменения в СП 31.13330.2012 в части приложения «В»: обоснование экономических диаметров осуществлять на основе затрат жизненного цикла систем водоснабжения и водоотведения.

4. Пересмотреть все имеющиеся методические пособия к СП 31.13330.2012 по обоснованию параметров систем водоснабжения и водоотведения и выполнять расчеты на основе критерия затрат жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат, 1972. 287 с.
2. Chipranich I., Evrich M., Radulovic M., Sekulich G. The energy – pressure nexus in the water

supply system // Water Supply. 2021. Vol. 21 (1). p. 344-355. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.285>.
3. Mangalekar R. D., Gumaste C. S. Residential water demand modelling and hydraulic reliability in design of building water supply systems: a

review // *Water Supply*. 2021. Vol. 21 (4). p. 1385-1397. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.021>.

4. Gajgate P. W., Mirajkar A. B. Irrigation pipe distribution network optimization with Jaya Algorithm: a hybrid approach // *Water Supply*. 2021. Vol. 21 (7). p. 3570-3583. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.122>.

5. Nuri M., Emadi A., Fazlula R. An agent-based model for water allocation optimization and comparison with the game theory approach // *Water Supply*. 2021. Vol. 21 (7). p. 3584-3601. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.124>.

6. Pujita S. N., Singh G., Jyotiprakash V. Improving the optimal solution of GoYang network – using genetic algorithm and differential evolution // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (1). p. 95-102. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.139>.

7. Tadokoro H., Koibuchi H., Takahashi S., Kakudo S., Takata Y., Moriya D., et al. Water supply control system for smarter electricity power usage adopting demand-response scheme // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (1). p. 140-147. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.143>.

8. Marquez J., Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (3). p. 878-888. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.011>.

9. Solgi M., Bozorg-Haddad O., Loáiciga H. A. A multi-objective optimization model for operation of intermittent water distribution networks // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (7). p. 2630-2647. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.159>.

10. Palod N., Prasad V., Khare R. Non-parametric optimization technique for water distribution in pipe networks // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (8). p. 3068-3082. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.200>.

11. Shabani M., Garneh N. Sh., Niaki S. T. A. Planning for urban water supply–demand portfolio using a hybrid robust stochastic optimization approach // *Water Supply*. 2020. Vol. 20 (8). p. 3433-3448. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.257>.

12. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.

REFERENCES

1. Abramov NN. Theory and methodology for calculating water supply and distribution systems. Moscow: Strojizdat; 1972. 287 p. (In Rus.).

2. Chipranich I, Evrich M, Radulovic M, Sekulich G. The energy – pressure nexus in the water supply system. *Water Supply*. 2021;21(1):344-355. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.285>.

3. Mangalekar RD, Gumaste CS. Residential water demand modelling and hydraulic reliability in design of building water supply systems: a review. *Water Supply*. 2021;21(4):1385-1397. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.021>.

4. Gajgate PW, Mirajkar AB. Irrigation pipe distribution network optimization with Jaya Algorithm: a hybrid approach. *Water Supply*. 2021;21(7):3570-3583. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.122>.

5. Nuri M, Emadi A, Fazlula R. An agent-based model for water allocation optimization and comparison with the game theory approach. *Water Supply*. 2021;21(7):3584-3601. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.124>.

6. Pujita SN, Singh G, Jyotiprakash V. Improving the optimal solution of GoYang network – using genetic algorithm and differential evolution. *Water Supply*. 2020;20(1):95-102. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.139>.

7. Tadokoro H, Koibuchi H, Takahashi S, Kakudo S, Takata Y, Moriya D, et al. Water supply control system for smarter electricity power usage adopting demand-response scheme. *Water Supply*. 2020;20(1):140-147. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.143>.

8. Marquez J, Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions. *Water Supply*. 2020;20(3):878-888. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.011>.

9. Solgi M, Bozorg-Haddad O, Loáiciga HA. A multi-objective optimization model for operation of inter-mittent water distribution networks. *Water Supply*. 2020;20(7):2630-2647. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.159>.

10. Palod N, Prasad V, Khare R. Non-parametric optimization technique for water distribution in pipe networks. *Water Supply*. 2020;20(8):3068-3082. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.200>.

11. Shabani M, Garneh NSh, Niaki STA. Planning for urban water supply–demand portfolio using a hybrid robust stochastic optimization approach. *Water Supply*. 2020;20(8):3433-3448. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.257>.

12. Merenkov AP, Hasilev VYa. Theory of hydraulic circuits. Moscow: Nauka; 1985. 278 p.

Информация об авторах

В. Р. Чупин,

доктор технических наук,
профессор кафедры городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: chupinvr@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

В. И. Мартьянов,

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры автомобильных дорог,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: martvliv@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2659-0355>

М. В. Матвеева,

доктор экономических наук,
профессор кафедры
экспертизы и управления недвижимостью,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Information about the authors

Victor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Urban Construction
and Economy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

Vladimir I. Mart'yanov,

Dr. Sci. (Phys. – Math.),
Professor of the Department of Highways,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: martvliv@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2659-0355>

Maria V. Matveeva,

Dr. Sci. (Econ.), Professor of the Department
of Real Estate Expertise and Management,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: expertiza@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9390-5444>

Вклад авторов

Чупин В. Р., Мартьянов В. И., Матвеева М. В.
имеют равные авторские права. Чупин В. Р.
несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Chupin V. R., Mart'yanov V. I., Matveeva M. V.
have equal author's rights. Chupin V. R. bears
the responsibility for plagiarism.

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.

Статья поступила в редакцию 02.02.2022.
Одобрена после рецензирования 28.02.2022.
Принята к публикации 01.03.2022.

The article was submitted 02.02.2022.
Approved after reviewing 28.02.2022.
Accepted for publication 01.03.2022.