

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000

## Минимизация рисков при обосновании структуры и параметров перспективных систем подачи и распределения воды

Виктор Романович Чупин<sup>1</sup>, Иванны Александровна Абросимова<sup>1,2</sup>,  
Роман Николаевич Ярыгин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ);  
г. Иркутск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Научно-производственное предприятие «Гидрикс» (НПП «Гидрикс»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Системы водоснабжения — стратегически важные, энергозатратные, капиталоемкие и инерционные системы. Все эти свойства приводят к практически полному отсутствию адаптационных механизмов для оптимизации условий эксплуатации данных систем. Причиной нарушения водоснабжения являются непредсказуемость развития систем и отсутствие алгоритмов определения вероятности миграции населения, уровня удельного водопотребления и аварийности. К ярким примерам таких ошибок можно отнести групповые водопроводы, построенные более 60 лет назад. В связи с оттоком населения и индустриализацией большое количество водопроводов продолжает оставаться «в земле», но не эксплуатируются, так как нет потребителей. Одновременно с этим существуют перегруженные системы больших городов и мегаполисов из-за активной точечной застройки, приводящей к несбалансированности инженерных систем. Парадоксально, но статистика за последние 20 лет показывает понижение уровня удельного водопотребления почти в два раза.

**Материалы и методы.** Предлагается при разработке перспективных схем водоснабжения учитывать неопределенность потребления воды, удельную стоимость электроэнергии в будущих периодах строительства систем водоснабжения и выбирать траектории их развития с минимальными экономическими и технологическими рисками.

**Результаты.** С помощью составления матрицы критериев принятия решения можно выбрать параметры перспективной системы водоснабжения в условиях неопределенности численности населения, удельных нагрузок водоснабжения, удельной стоимости электроэнергии и др.

**Выводы.** Следует переходить к многовариантному проектированию и рассматривать водопотребление, численность населения, стоимость электроэнергии как нечеткие и неопределенные значения и выбирать из них те, которые обеспечивают минимальные риски по стоимости их жизненного цикла.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** системы подачи и распределения воды, неопределенность в численности населения и водопотребления, выбор предпочтительного варианта строительства и реконструкции систем водоснабжения, матрица рисков, стоимость жизненного цикла, критерии принятия решения, водопроводные системы, эксплуатация и проектирование водопроводных систем, удельное водопотребление, электропотребление

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чупин В.Р., Абросимова И.А., Ярыгин Р.Н. Минимизация рисков при обосновании структуры и параметров перспективных систем подачи и распределения воды // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 991–1000. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000

Автор, ответственный за переписку: Иванны Александровна Абросимова, abrosimovaia@mgsu.ru.

## Risk-Based Justification of the Structure and Parameters of Advanced Water Supply and Distribution Systems

Viktor R. Chupin<sup>1</sup>, Ivanna A. Abrosimova<sup>1,2</sup>, Roman N. Yarygin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University (INRTU); Irkutsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Research and Production Enterprise Hydrix; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Water supply systems are strategically important, energy-intensive, capital-intensive, and highly inertial systems. These characteristics result in a virtually complete lack of adaptive mechanisms for optimizing their operating conditions.

tions. Water supply disruptions are caused by the unpredictability of system development patterns and by the lack of algorithms for determining the probability of population migration tracks, specific water consumption and system failure rates. Demonstrative examples of such errors include group water supply systems built more than 60 years ago. Due to population outflow and industrial decline, many water supply systems remain underground but are no longer operated because of insufficient consumer demand. At the same time, systems in large cities and megalopolises are overloaded because of active infill development, which causes imbalances in utility networks. Paradoxically, statistics for the past 20 years show that specific water consumption has decreased by almost half.

**Materials and methods.** When designing advanced water supply schemes, uncertainties related to future water demand and electricity unit costs should be considered, and system development trajectories that minimize economic and technological risks should be selected.

**Results.** A decision-making criteria matrix can be applied to select the parameters of a future water supply system under conditions of uncertainty related to population size, unit water demand, electricity costs, and other factors.

**Conclusions.** A multivariant design approach should be adopted, treating water consumption, population size, and electricity cost as fuzzy and uncertain variables and selecting options that minimize life-cycle cost risks.

**KEYWORDS:** water supply and distribution systems, uncertainty in population size and water consumption, selection of the preferred option for construction and reconstruction of water supply systems, risk matrix, life-cycle cost, decision-making criteria, water supply networks, operation and design of water supply systems, specific water consumption, electricity consumption

**FOR CITATION:** Chupin V.R., Abrosimova I.A., Yarygin R.N. Risk-Based Justification of the Structure and Parameters of Advanced Water Supply and Distribution Systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):991-1000. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000 (rus.).

*Corresponding author:* Ivanna A. Abrosimova, abrosimovaia@mgso.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что проектирование — процесс, позволяющий создать еще не существующий объект. Объект надо запроектировать так, чтобы он функционировал в предстоящих периодах его эксплуатации, а будущее неопределенно и его нельзя выразить детерминированными значениями (это основное противоречие проектирования). Градостроители и разработчики мастер-планов уже столкнулись с тем, что вместо того, чтобы развивать системы водоснабжения, их необходимо консервировать и выводить из строя отдельные неэффективные участки и сооружения. На этом фоне за счет энергосберегающей политики продолжает снижаться удельное водопотребление, и когда оно стабилизируется или снова начнет расти трудно прогнозировать [1–3].

В основе существующей методики проектирования систем водоснабжения лежат знания о расчетных нагрузках водоснабжения, которые вычисляются на базе их удельных значений (для жилищного сектора — это удельное потребление воды на одного человека в сутки). Такие значения представлены в СП 31.13330.2021 в виде интервала 165–180 л/чел в сут. Причем эти цифры за последние годы менялись несколько раз (в СНиП 2.04.02–84 предлагались нормы 230–350 л/чел в сут, в СП 31.13330.2010 — 220–280 л/чел в сут, а в СП 31.13330.2012 — 195–220 л/чел в сут). Согласно Градостроительному кодексу (ГрК) 2023 и Постановлению Правительства РФ от 05.09.2013 № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения» схемы водоснабжения и водоотведения разрабатываются на период не менее 10 лет. Однако, что будет через 10 лет, будет удельное потребление воды также уменьшаться, или начнет увеличиваться, невозможно точно определить и спрогнозировать. Даже если пользоваться последним СП 31.13330.2021, где рекомендуются не конкрет-

ные числа, а интервал значений удельных расходов, 165–180 л/чел в сут, какое значение из них принимать в расчеты, рекомендации отсутствуют. При этом проектировщики должны понимать, что риски, которые возникают в случае завышения или занижения расчетных нагрузок, очень велики, поскольку в том и в другом случае потребуются реконструкция и огромные финансовые вложения [4–11].

Отдельного внимания заслуживает вариативность в стоимости электроэнергии, которая существенно изменяется как во времени, так и по территориям нашей страны. В настоящее время стоимость электроэнергии имеет широкий диапазон и изменяется от 2 руб/кВт·ч в Иркутской области (г. Иркутск) до 30 руб/кВт·ч в Чукотском автономном округе (г. Анадырь). Возникает вопрос, какую стоимость электроэнергии принимать в расчетах проектировщикам. Затруднительно, но от стоимости зависят параметры насосных станций и диаметры трубопроводов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работах [12–14] на основе стоимости жизненного цикла (ЖЦ) определены оптимальные скорости движения сточной жидкости в напорных трубопроводах и получена следующая формула для расчета диаметра трубопровода из полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR 17:

$$d = 0,477 \cdot x_i^{0,24} \cdot z_i^{0,143} \cdot T_i^{0,072}, \quad (1)$$

где  $x$  — расход воды, м³/с;  $z$  — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;  $T$  — время жизненного цикла, годы.

Используя формулу (1) 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, представленные в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что оптимальные диаметры напорных трубопроводов в зависимости от стоимо-

Табл. 1. Значения оптимальных диаметров для различных регионов страны  
Table 1. Optimal diameters for different regions of the country

| Административные центры субъектов Российской Федерации<br>Administrative centers of the constituent entities of the Russian Federation | Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч<br>Cost of electricity, RUB/kWh | Диаметр, м, при $T = 10$ лет<br>Diameter, m, at $T = 10$ years | Диаметр, м, стандарт при $T = 10$ лет<br>Standard diameter, m, at $T = 10$ years | Диаметр, м, при $T = 50$ лет<br>Diameter, m, at $T = 50$ years | Диаметр, м, стандарт при $T = 50$ лет<br>Standard diameter, m, at $T = 50$ years | Диаметр, м, при $T = 100$ лет<br>Diameter, m, at $T = 100$ years | Диаметр, м, стандарт при $T = 100$ лет<br>Standard diameter, m, at $T = 100$ years |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                      | 2                                                                   | 3                                                              | 4                                                                                | 5                                                              | 6                                                                                | 7                                                                | 8                                                                                  |
| Иркутск<br>Irkutsk                                                                                                                     | 2,0                                                                 | 0,525                                                          | 0,56                                                                             | 0,591                                                          | 0,63                                                                             | 0,621                                                            | 0,63                                                                               |
| Новосибирск<br>Novosibirsk                                                                                                             | 4,2                                                                 | 0,585                                                          | 0,63                                                                             | 0,657                                                          | 0,71                                                                             | 0,691                                                            | 0,71                                                                               |
| Москва<br>Moscow                                                                                                                       | 8,0                                                                 | 0,642                                                          | 0,71                                                                             | 0,721                                                          | 0,8                                                                              | 0,758                                                            | 0,8                                                                                |
| Якутск<br>Yakutsk                                                                                                                      | 11,0                                                                | 0,672                                                          | 0,71                                                                             | 0,755                                                          | 0,8                                                                              | 0,794                                                            | 0,8                                                                                |
| Анадырь<br>Anadyr                                                                                                                      | 30,0                                                                | 0,775                                                          | 0,8                                                                              | 0,870                                                          | 0,9                                                                              | 0,915                                                            | 1,0                                                                                |

сти электроэнергии изменяются в диапазоне от 0,63 до 1,0 м, т.е. почти в два раза. Как уже отмечалось, возникают риски от непредсказуемого роста тарифов на электроэнергию. Общественное мнение может воздействовать на исполнительные власти с целью выравнивания тарифов. Если такое произойдет, то в некоторых регионах (например, в Иркутской области) возникнут сложные социальные и экономические проблемы, поскольку промышленность и жилищно-коммунальное хозяйство ориентированы на низкие тарифы электроэнергии, индивидуальный жилищный сектор использует электрическое отопление, транспортировка воды является энергозатратной.

Рассмотрим возможные различные сценарии изменения удельной стоимости электроэнергии, таким образом можно определить риски, которые при этом могут возникать от принятия того или иного решения.

Объект исследования — участок трубопровода длиной 1 км с расходом 0,5 м³/с и по каждому варианту трубопроводов определим стоимость их жизненного цикла (СЖЦ) на основе упрощенной формулы [1]:

$$\text{СЖЦ} = K + T (0,097 \cdot K + C_{\text{элк}}), \tag{2}$$

где  $T$  — время ЖЦ, год.

На основании НЦС 81-02-14–2025 для полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR представим капиталовложения ( $K$ ) как функцию диаметров трубопроводов, тыс. руб.:

$$K = (20\,371 \cdot d^2 + 4779,4 \cdot d + 7233) \cdot L, \tag{3}$$

где  $L$  — длина трубопровода, км.

Затраты электроэнергии определим по следующей формуле:

$$C_{\text{элк}} = 108 \cdot z_{\text{элк}} \cdot h \cdot x, \tag{4}$$

где  $C_{\text{элк}}$  — затраты электроэнергии, тыс. руб/год;  $z_{\text{элк}}$  — единичная стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Потери напора  $h$  для полиэтиленовых труб рассчитываются по формуле Шевелева [15, 16]:

$$h = 0,001052 \cdot x_i^{1,774} / d_i^{4,774} \cdot l_i, \tag{5}$$

где  $h$  — потери напора на участке трубопровода, м. в. ст.;  $x$  — расход транспортируемой воды, м³/с;  $d, l$  — внутренний диаметр и длина трубопровода, м.

Результаты расчетов по вышеприведенным формулам представлены в табл. 2.

Далее воспользуемся результатами зарубежных исследователей в этой области [17–23] и с учетом полученных значений (см. табл. 2) сформируем матрицу всевозможных исходов (табл. 3). Данная таблица состоит из  $n$  строк и  $n$  столбцов по количеству возможных значений удельной стоимости электроэнергии. Второй столбец означает, что выбрали один вариант удельной стоимости электроэнергии (например, 2,0 руб. за кВт·ч), а после реализации проекта стоимость электроэнергии оказалась 4,18 руб. за кВт·ч. Следовательно, для этого варианта с учетом диаметра 630 мм вычисляем затраты электроэнер-

Табл. 2. Определение стоимости жизненного цикла трубопровода при различных удельных стоимостях электроэнергии  
Table 2. Life-cycle cost of a pipeline at different unit electricity costs

| Административные центры субъектов Российской Федерации<br>Administrative centers of the constituent entities of the Russian Federation | Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч<br>Cost of electricity, RUB/kWh | Диаметр, стандарт, м, при T = 100 лет<br>Standard diameter, m, at T = 100 years | Потери напора, м<br>Head loss, m | Затраты электроэнергии, млн руб. за 100 лет<br>Electricity costs, million RUB over 100 years | Стоимость труб, млн руб.<br>Pipe cost, million RUB | Стоимость жизненного цикла, млн руб.<br>Life-cycle cost, million RUB |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                      | 2                                                                   | 3                                                                               | 4                                | 5                                                                                            | 6                                                  | 7                                                                    |
| Иркутск<br>Irkutsk                                                                                                                     | 2,0                                                                 | 0,63                                                                            | 2,84                             | 30,7                                                                                         | 28,7                                               | 59,4                                                                 |
| Новосибирск<br>Novosibirsk                                                                                                             | 4,18                                                                | 0,71                                                                            | 1,55                             | 35,0                                                                                         | 41,3                                               | 76,3                                                                 |
| Москва<br>Moscow                                                                                                                       | 8,0                                                                 | 0,8                                                                             | 0,85                             | 36,7                                                                                         | 42,4                                               | 79,1                                                                 |
| Якутск<br>Yakutsk                                                                                                                      | 11,0                                                                | 0,8                                                                             | 0,85                             | 50,5                                                                                         | 42,4                                               | 92,9                                                                 |
| Анадырь<br>Anadyr                                                                                                                      | 30,0                                                                | 1,0                                                                             | 0,28                             | 45,4                                                                                         | 63,3                                               | 118,7                                                                |

Табл. 3. Матрица рисков и вычисления критериев принятия решения  
Table 3. Matrix for risks and decision-making criteria computations

| Вариант<br>Option | 2,0  | 4,18 | 8,0   | 11,0  | 30,0  | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |
|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                 | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | Критерий<br>Criterion | Критерий<br>Criterion | Критерий<br>Criterion | Критерий<br>Criterion | Критерий<br>Criterion |
| 2,0               | 59,4 | 92,8 | 151,4 | 197,4 | 488,7 | 197,8                 | 488,7                 | 59,4                  | 370,0                 | 274,1                 |
| 4,18              | 58,0 | 76,3 | 108,3 | 133,4 | 292,4 | 133,7                 | 292,4                 | 58,4                  | 173,7                 | 175,2                 |
| 8,0               | 51,6 | 61,6 | 79,1  | 92,9  | 180,1 | 93,06                 | 180,1                 | 51,6                  | 61,4                  | 115,9                 |
| 11,0              | 51,6 | 61,6 | 79,1  | 92,9  | 180,1 | 93,06                 | 180,1                 | 51,6                  | 61,4                  | 115,9                 |
| 30,0              | 66,4 | 69,6 | 75,4  | 79,9  | 118,7 | 82,0                  | 118,7                 | 66,4                  | 8,0                   | 92,6                  |

гии по формуле (2) с удельной стоимостью 4,18 руб. за кВт·ч и за 100 лет эксплуатации. Такие же вычисления выполняются и для стоимости электроэнергии 8,0, 11,0 и 30,0 руб. за кВт·ч (см. строку 3). В итоге по каждому варианту формируются СЖЦ.

Для выбора предпочтительного варианта воспользуемся следующими критериями принятия решения [24]: 1 — критерий равновероятных рисков Лапласа; 2 — критерий пессимизма Вальда; 3 — критерий максимального оптимизма; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа; 5 — критерий доверия Гурвица. Выбирается вариант, для которого будет выполняться наибольшее число критериев.

В итоге после определения критериев принятия решения 1–5 (4 критерия из 5 за вариант в 30,0 руб. за кВт·ч), следовательно, этот вариант и можно рекомендовать к реализации проекта. Логическое объяснение выбора этого варианта следует из того, что эксплуатационные затраты, в том числе затраты электроэнергии за ЖЦ, доминируют над единовременными капиталовложениями и надо стремиться к их минимизации.

менными капиталовложениями и надо стремиться к их минимизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Очевидно обоснование параметров напорных трубопроводов можно осуществить в условиях неопределенности удельных значений водопотребления и вариативности удельных стоимостей электроэнергии. В этом случае матрица всевозможных исходов **М** будет иметь кубическую форму и размерность:

$$\mathbf{M} = \{a_{ij}\}, \text{ размерностью — } (m \times m \times n), \quad (6)$$

где  $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; m$  — количество интервалов области неопределенности расходов водопотребления;  $n$  — количество интервалов области неопределенности стоимости удельной электроэнергии. Данную матрицу сложно отразить в 3D-формате. Однако для данного примера вариативность электроэнергии можно представить пятью матрицами (по количеству значений стоимости электро-



Табл. 4. Матрица всевозможных исходов стоимости жизненного цикла  $T = 50$  лет, млн руб/год, при удельных затратах  $z_{\text{элк}} = 2,0$  руб. за кВт·ч

Table 4. Matrix of possible life-cycle cost outcomes for  $T = 50$  years, RUB million/year, at a unit electricity cost of  $z_{\text{elec}} = 2.0$  RUB/kWh

| $D, \text{ м}$<br>$D, \text{ m}$ | Капиталозатраты, тыс. руб.<br>Capital expenditures, thousand<br>RUB | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$<br>$Q, \text{ m}^3/\text{s}$ | 0,1   | 0,122 | 0,144 | 0,167 | 0,189 | 0,211 | 0,233 | 0,256 | 0,278 | 0,3   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                                | 2                                                                   | 3                                                      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
| 0,315                            | 42,99                                                               | 0,1                                                    | 47,7  | 51,5  | 56,8  | 64,3  | 73,6  | 85,2  | 99,6  | 117,8 | 139,0 | 162,5 |
| 0,355                            | 48,4                                                                | 0,122                                                  | 51,0  | 53,0  | 55,9  | 60,0  | 65,0  | 71,3  | 79,1  | 88,8  | 100,3 | 112,9 |
| 0,4                              | 55,6                                                                | 0,144                                                  | 57,1  | 58,2  | 59,7  | 61,9  | 64,7  | 68,1  | 72,3  | 77,6  | 83,8  | 90,6  |
| 0,4                              | 55,6                                                                | 0,167                                                  | 57,1  | 58,2  | 59,7  | 61,9  | 64,7  | 68,1  | 72,3  | 77,6  | 83,8  | 90,6  |
| 0,4                              | 55,6                                                                | 0,189                                                  | 57,1  | 58,2  | 59,7  | 61,9  | 64,7  | 68,1  | 72,3  | 77,6  | 83,8  | 90,6  |
| 0,5                              | 75,9                                                                | 0,211                                                  | 76,4  | 76,7  | 77,2  | 77,9  | 78,8  | 79,9  | 81,3  | 83,0  | 84,9  | 87,1  |
| 0,5                              | 75,9                                                                | 0,233                                                  | 76,4  | 76,7  | 77,2  | 77,9  | 78,8  | 79,9  | 81,3  | 83,0  | 84,9  | 87,1  |
| 0,5                              | 75,9                                                                | 0,256                                                  | 76,4  | 76,7  | 77,2  | 77,9  | 78,8  | 79,9  | 81,3  | 83,0  | 84,9  | 87,1  |
| 0,5                              | 75,9                                                                | 0,278                                                  | 76,4  | 76,7  | 77,2  | 77,9  | 78,8  | 79,9  | 81,3  | 83,0  | 84,9  | 87,1  |
| 0,63                             | 111,0                                                               | 0,3                                                    | 111,1 | 111,2 | 111,4 | 111,6 | 111,9 | 112,2 | 112,7 | 113,2 | 113,8 | 114,4 |

энергии), а каждая матрица будет отражать вариативность возможных нагрузок водопотребления. Следует отметить, что нормы удельного водопотребления, рекомендуемые для проектирования систем водоснабжения в СП 31.13330.2021, рассчитаны на перспективу 1–3 года, но если рассматривать временной интервал более 10 лет, то за счет энергосберегающей политики и технологий удельное водопотребление может уменьшиться до значений 100 л/чел в сутки, а может за счет устройства бассейнов в квартирах, специальных посудомоечных и стиральных машин вернуться на исходные позиции в 250 л/чел в сут. В этом случае для населенного района 100 тыс. чел. диапазон расходов расширится до значений 0,1–0,3 м³/с.

В табл. 4 представлена матрица возможных исходов по СЖЦ (вычисленной на основании стоимости электроэнергии 2,0 руб/кВт·ч) для расходов водоснабжения в интервале значений от 0,1 до 0,3 м³/с. В табл. 4 в третьем столбце и первой строке представлены диапазоны исследуемых возможных перспективных расходов потребления воды районом новой застройки. В первом столбце приведены для каждого значения возможных расходов диаметры трубопровода длиной 1 км, вычисленные согласно формуле (1), а в столбце 2 представлены единовременные капиталовложения в трубопроводы соответствующего диаметра, вычисленные по выражению (3). В столбцах 4–13 приведены стоимости жизненного цикла трубопровода при различных исходах нагрузок перспективного района водоснабжения (приняли 0,1 м³/с, а он оказался 0,122, 0,144, ..., 3 м³/с).

Применяя к матрице 4 критерии принятия решения 1–5, получаем следующие предложения: 1 —

критерий равновероятных рисков Лапласа предлагает диаметр 0,4 м; 2 — критерий пессимизма Вальда, диаметр 0,5 м; 3 — критерий максимального оптимизма, диаметр 0,315 м; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа, диаметр 0,4 м; 5 — критерий доверия Гурвица, диаметр 0,4 м. Следовательно, при использовании в проекте диаметра трубопровода 0,4 м (предпочтение отдали трем критериям) риск будет минимальным.

Для наглядности представления минимальные риски будем обозначать зеленым цветом, несущественные — синим, средние — желтым, высокие — коричневым, очень высокие — красным. В соответствии с данной цветовой градацией заполним табл. 4 и будем ее читать следующим образом. Выбор трубопровода диаметром 0,4 м обеспечивает минимальный риск. Если по каким-то условиям трубопровод диаметром 0,4 м не подходит или он отсутствует, используем трубопровод диаметром 0,315 и т.д.

Применяя к матрице 5 критерии принятия решения 1–5, получаем следующие предложения: 1 — критерий равновероятных рисков Лапласа предлагает диаметр 0,63 м; 2 — критерий пессимизма Вальда, диаметр 0,63 м; 3 — критерий максимального оптимизма, диаметр 0,5 м; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа, диаметр 0,63 м; 5 — критерий доверия Гурвица, диаметр 0,63 м. Следовательно, применяя в проекте диаметр трубопровода 0,63 м (предпочтение отдали четырем критериям), мы понесем минимальные риски.

В соответствии с принятыми цветовыми решениями проанализируем табл. 5 следующим образом. Выбор трубопровода диаметром 0,63 м обеспечивает минимальный риск. Если по каким-то условиям трубопровод диаметром 0,63 м не подходит

Табл. 5. Матрица всевозможных исходов стоимости жизненного цикла  $T = 50$  лет, млн руб/год, при удельных затратах  $z_{элк} = 30$  руб. за кВт·ч

Table 5. Matrix of possible life-cycle cost outcomes for  $T = 50$  years, RUB million/year, at a unit electricity cost of  $z_{elec} = 30$  RUB/kWh

| $D, м$<br>$D, m$ | Капитало-<br>затраты,<br>тыс. руб.<br>Capital<br>expenditures,<br>thousand RUB | $Q, м^3/с$<br>$Q, m^3/s$ | 0,1   | 0,122 | 0,144 | 0,167 | 0,189 | 0,211 | 0,233 | 0,256  | 0,278  | 0,3    |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 0,315            | 42,99                                                                          | 0,1                      | 114,3 | 170,3 | 249,7 | 362,0 | 501,6 | 677,1 | 892,3 | 1164,4 | 1473,3 | 1834,9 |
| 0,355            | 48,4                                                                           | 0,122                    | 87,5  | 117,8 | 160,9 | 221,6 | 297,3 | 391,9 | 508,2 | 654,7  | 821,2  | 1015,6 |
| 0,4              | 55,6                                                                           | 0,144                    | 77,0  | 93,6  | 117,0 | 150,1 | 191,0 | 242,6 | 305,1 | 384,5  | 474,5  | 579,5  |
| 0,4              | 55,6                                                                           | 0,167                    | 77,0  | 93,6  | 117,0 | 150,1 | 191,0 | 242,6 | 305,1 | 384,5  | 474,5  | 579,5  |
| 0,4              | 55,6                                                                           | 0,189                    | 77,0  | 93,6  | 117,0 | 150,1 | 191,0 | 242,6 | 305,1 | 384,5  | 474,5  | 579,5  |
| 0,5              | 75,9                                                                           | 0,211                    | 83,0  | 88,4  | 96,0  | 106,5 | 119,7 | 136,1 | 156,3 | 181,7  | 210,1  | 243,6  |
| 0,5              | 75,9                                                                           | 0,233                    | 83,0  | 88,4  | 96,0  | 106,5 | 119,7 | 136,1 | 156,3 | 181,7  | 210,1  | 243,6  |
| 0,5              | 75,9                                                                           | 0,256                    | 83,0  | 88,4  | 96,0  | 106,5 | 119,7 | 136,1 | 156,3 | 181,7  | 210,1  | 243,6  |
| 0,5              | 75,9                                                                           | 0,278                    | 83,0  | 88,4  | 96,0  | 106,5 | 119,7 | 136,1 | 156,3 | 181,7  | 210,1  | 243,6  |
| 0,63             | 111                                                                            | 0,3                      | 113,2 | 114,9 | 117,3 | 120,7 | 124,7 | 129,8 | 136,3 | 144,1  | 152,8  | 163,0  |

или он отсутствует, используем трубопровод диаметром 0,4 и т.д. Логическое объяснение такой градации рисков объясняется тем, что при максимальных значениях стоимости электроэнергии следует принимать наибольшие диаметры трубопроводов из возможных значений.

Обобщая все пять матриц всевозможных исходов по нагрузкам водопотребления для исследуемого интервала значений (0,1, ..., 0,3) м³/с и исследуемого интервала удельной стоимости электроэнергии (2,0, ..., 30,0) руб. за кВт·ч, можно прийти к следу-

ющей матрице выбора решений, представленной в табл. 6.

В табл. 6 каждое решение обозначено различным цветом. Наименьшим риском обладает трубопровод с диаметром 0,5 м, а соответствующий ему диапазон удельной стоимости электроэнергии составляет от 4,18–11,0 руб. за кВт·ч. Этот вариант и рекомендуется к реализации. Следующий вариант (несущественный риск) —рекомендуется диаметр трубопровода 0,63 м и удельная стоимость электроэнергии 8,0–11,0 руб. за кВт·ч.

Табл. 6. Выбор предпочтительного варианта с учетом диаметра трубопровода и стоимости электроэнергии, для которой он и соответствующая насосная станция должны быть рассчитаны

Table 6. Selection of the preferred option by pipeline diameter and electricity cost used to design the pipeline and the corresponding pumping station

| $C_{элк}, \text{руб. за кВт}\cdot\text{ч}$<br>$C_{elec}, \text{RUB/kWh}$ |                                                      | 2,00                                                  | 4,18     | 8,00     | 11,00    | 30,00   | $K_{кан}, \text{тыс. руб.}$<br>$K_{CE}, \text{thousand RUB}$ |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------|--------------------------------------------------------------|
| $Q, \text{м}^3/\text{с}$<br>$Q, \text{m}^3/\text{s}$                     |                                                      | 0,1                                                   | 0,122    | 0,167    | 0,256    | 0,3     |                                                              |
| $D, \text{м}$<br>$D, \text{m}$                                           | $Q, \text{м}^3/\text{с}$<br>$Q, \text{m}^3/\text{s}$ | Зона допустимых рисков<br><i>Acceptable risk zone</i> |          |          |          |         |                                                              |
| 0,315                                                                    | 0,1                                                  |                                                       |          |          |          |         | 42 989,6                                                     |
| 0,355                                                                    | 0,122                                                |                                                       |          |          |          |         | 48 415,6                                                     |
| 0,4                                                                      | 0,167                                                |                                                       |          |          |          |         | 55 634,5                                                     |
| 0,5                                                                      | 0,256                                                |                                                       |          |          |          |         | 75 902,3                                                     |
| 0,63                                                                     | 0,3                                                  |                                                       |          |          |          |         | 110 964                                                      |
| $K_{кан}, \text{тыс. руб.}$<br>$K_{CE}, \text{thousand RUB}$             |                                                      | 42 989,6                                              | 48 415,6 | 55 634,5 | 75 902,3 | 110 964 | —                                                            |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход можно применить для выбора параметров перспективной системы водоснабжения в условиях неопределенности численности населения, удельных нагрузок водоснабжения, удельной стоимости электроэнергии и др.

Предлагаемый подход реализован в программном комплексе [25], который позволяет оперативно производить вычисления по вышеизложенной методике, исследовать устойчивость принимаемых решений и управлять процессом развития систем водоснабжения при поэтапном их строительстве.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При рассмотрении перспективных схем водоснабжения возникают неопределенности, связанные с объемами водопотребления, численностью насе-

ления, стоимостью электроэнергии и другими параметрами. Появляются риски от ошибочных решений, и эти риски могут приводить к значительным финансовым затратам и экологическим ущербам.

2. Следует переходить к многовариантному проектированию и рассматривать водопотребление, численность населения, стоимость электроэнергии как нечеткие и неопределенные значения и выбирать из них те, которые обеспечивают минимальные риски по стоимости их ЖЦ.

3. Реализацию схем водоснабжения рекомендуется осуществлять поэтапно в виде очередей строительства с оценкой планируемых и достигнутых значений удельного водопотребления и численности населения. При отклонении от проектных нагрузок предлагается корректировать решение за счет оптимальных реконструкций и для последующей очереди строительства оценивать финансовые риски.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин Р.В., Примин О.Г. Обоснование параметров систем водоотведения в условиях неопределенности перспективного потребления воды и сброса стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 11. С. 36–43. EDN ZRKPZR.
2. Feng F., Zhang Yu., Chen Zh., Ni J., Feng Yu., Xie Yu. et al. Machine learning to assess and support safe drinking water supply : a systematic review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Issue 1. P. 114481. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114481. EDN NJYAPH.
3. El Bilali A., Taleb A. State-of-the art-on irrigation water quality management using data-driven methods: Practical application, limitations, and prospective directions // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2024. Vol. 136. P. 103794. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103794. EDN HGISYS.
4. Чупин Р.В., 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. DOI: 10.35776/VST.2022.11.02. EDN XXZIEA.
5. Чупин Р.В. Индикативное и адаптивное управление развитием систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 8. С. 24–29. EDN XWQJJR.
6. Ibuot U.P. Communication Strategies for Sustainable Water Supply Systems Development in Select Lagos and Ogun Communities // GVU Journal of Research and Development. 2025. Vol. 2. Issue 1. Pp. 176–187.
7. Чупин Р.В., Фам Н.М. Оптимизация структуры и параметров развивающихся систем группового водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 30–37. EDN VRGOFJ.
8. Bhattarai B.N., Pasitsuparoad P., Gyawali S., Joshi H.P., Ojha R. Can small towns sustain their own water supply systems? A systematic review of what works and what doesn't // International Journal of Advanced Research. 2025.
9. Libey A.K. The Worth of Water: Evaluating Interventions to Achieve Financially and Operationally Sustainable Urban and Rural Water Systems in Low-Income Settings. University of Colorado at Boulder, 2022.
10. Benavides-Muñoz H.M. Index of Sustainability of Water Supply Systems (ISA): An Autonomous Framework for Urban Water Sustainability Assessment in Data-Scarce Settings // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 24. P. 11293. DOI: 10.3390/su172411293. EDN XMJBGV.
11. Чупин Р.В., Мороз М.В. Применение автомобильного транспорта в системах группового водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 57–64. DOI: 10.35776/VST.2021.05.07. EDN RDVUAL.
12. Чупин Р.В., Мороз М.В., Бобер В.А. Обоснование диаметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. DOI: 10.35776/VST.2022.04.07. EDN CIOYJH.
13. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y. et al. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems // Smart Cities. 2025. Vol. 8. Issue 1. DOI: 10.3390/smartcities8010014. EDN UGBWSI.
14. Altaf M., Jaffari R., Alalaoul W.S., Musarat M.A., Ammad S. Developing automated strategy of life cycle cost analysis (LCCA) with building information modeling (BIM) integration for building projects // Results in

Engineering. 2025. Vol. 25. P. 104179. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104179. EDN FCQHXY.

15. Sharif S.A., Hammad A. Simulation-based multi-objective optimization of institutional building renovation considering energy consumption, life-cycle cost and life-cycle assessment // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 21. Pp. 429–445. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.11.006

16. Erto P., Lanzotti A. Statistical model “Life Cycle Cost-Reliability” for a new mass transit vehicle // WIT Transactions on The Built Environment. 2026. Vol. 6.

17. Shi H., Wang X., Guo H., Hao H. Risk assessment models to investigate the impact of emergency on a water supply system // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 8. Pp. 3542–3556. DOI: 10.2166/ws.2020.224. EDN FCLXNS.

18. Odjegba E., Oluwasanya G., Sadiq A., Brion G. Sustainability and risk assessment matrix (SRAM): pathway to water security // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 7. Pp. 2928–2940. DOI: 10.2166/ws.2020.196. EDN EFJJKD.

19. Nesticò A., De Mare G., Maselli G. An economic model of risk assessment for water projects // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 6. Pp. 2054–2068. DOI: 10.2166/ws.2020.093. EDN BAYGQZ.

20. Marques J., Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 3. Pp. 878–888. DOI: 10.2166/ws.2020.011. EDN HYQRJO.

21. Wang Zh., Wu X., Wang H., Wu T. Prediction and analysis of domestic water consumption based on optimized grey and Markov model // Water Supply. 2021. Vol. 21. Issue 7. Pp. 3887–3899. DOI: 10.2166/ws.2021.146. EDN HXXBWZ.

22. Pandey P., Dongre S., Gupta R. Probabilistic and fuzzy approaches for uncertainty consideration in water distribution networks : a review // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 1. Pp. 13–27. DOI: 10.2166/ws.2019.141

23. Kalbusch A., Ghisi E. Energy consumption in the life cycle of plumbing fixtures // Water Supply. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 70–78. DOI: 10.2166/ws.2018.053

24. Орлов А.И. Теория принятия решений : учебное пособие. М. : Экзамен, 2005. 656 с.

25. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024687562 от 20.11.2024. Минимизация рисков при проектировании трубопроводных систем городского хозяйства / Мелехов Е.С., Ярыгин Р.Н., Бобер В.А.

Поступила в редакцию 13 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Романович Чупин** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; РИНЦ ID: 475565, Scopus: 57199418096, ORCID: 0000-0001-5460-4780; chupinvr@ex.istu.edu;

**Иванна Александровна Абросимова** — аспирант кафедры городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; старший преподаватель кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1066562, Scopus: 57194454961, ResearcherID: AAC-2335-2022, ORCID: 0000-0003-4207-4449; abrosimovaia@mgsu.ru;

**Роман Николаевич Ярыгин** — аспирант кафедры городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; главный инженер; **Научно-производственное предприятие «Гидрикс» (НПП «Гидрикс»); г. Москва, п. Секерино, д. 6, стр. 24; yarygin.r@hydrig.ru.**

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Chupin R.V., Primin O.G. Substantiation of the wastewater disposal system parameters in the context of projected water consumption and wastewater discharge uncertainty. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2017; 11:36–43. EDN ZRKPZR. (rus.).

2. Feng F., Zhang Yu., Chen Zh., Ni J., Feng Yu., Xie Yu. et al. Machine learning to assess and support safe drinking water supply : a systematic review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025; 13(1):114481. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114481. EDN NJYAPH.

3. El Bilali A., Taleb A. State-of-the art-on irrigation water quality management using data-driven methods: Practical application, limitations, and prospective directions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2024; 136:103794. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103794. EDN HGISYS.



4. Chupin R., Moroz M., Chupin V. 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. DOI: 10.35776/VST.2022.11.02. EDN XXZIEA. (rus.).
5. Chupin R.V. Indicative and adaptive management of the water supply and wastewater disposal system development. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 8:24-29. EDN XWQJJR. (rus.).
6. Ibut U.P. Communication Strategies for Sustainable Water Supply Systems Development in Select Lagos and Ogun Communities. *GVU Journal of Research and Development*. 2025; 2(1):176-187.
7. Chupin R.V., Fam N.M. Optimization of the structure and parameters of the developing group water supply systems. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 1:30-37. EDN VRGOFJ. (rus.).
8. Bhattarai B.N., Pasitsuparoad P., Gyawali S., Joshi H.P., Ojha R. Can small towns sustain their own water supply systems? A systematic review of what works and what doesn't. *International Journal of Advanced Research*. 2025.
9. Libey A.K. *The Worth of Water: Evaluating Interventions to Achieve Financially and Operationally Sustainable Urban and Rural Water Systems in Low-Income Settings*. University of Colorado at Boulder, 2022.
10. Benavides-Muñoz H.M. Index of Sustainability of Water Supply Systems (ISA): An Autonomous Framework for Urban Water Sustainability Assessment in Data-Scarce Settings. *Sustainability*. 2025; 17(24):11293. DOI: 10.3390/su172411293. EDN XMJBGV.
11. Chupin R., Moroz M. The use of road transport in the systems of group water supply and wastewater disposal. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021; 5:57-64. DOI: 10.35776/VST.2021.05.07. EDN RDVUAL. (rus.).
12. Chupin R., Moroz M., Bober V. 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. DOI: 10.35776/VST.2022.04.07. EDN CIOYJH. (rus.).
13. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremenkova E.A., Demin A.Y. et al. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025; 8(1). DOI: 10.3390/smartcities8010014. EDN UGBWSI.
14. Altaf M., Jaffari R., Alalaoul W.S., Musarat M.A., Ammad S. Developing automated strategy of life cycle cost analysis (LCCA) with building information modeling (BIM) integration for building projects. *Results in Engineering*. 2025; 25:104179. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104179. EDN FCQHGY.
15. Sharif S.A., Hammad A. Simulation-based multi-objective optimization of institutional building renovation considering energy consumption, life-cycle cost and life-cycle assessment. *Journal of Building Engineering*. 2019; 21:429-445. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.11.006
16. Erto P., Lanzotti A. Statistical model "Life Cycle Cost-Reliability" for a new mass transit vehicle. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2026; 6.
17. Shi H., Wang X., Guo H., Hao H. Risk assessment models to investigate the impact of emergency on a water supply system. *Water Supply*. 2020; 20(8):3542-3556. DOI: 10.2166/ws.2020.224. EDN FCLXNS.
18. Odjegba E., Oluwasanya G., Sadiq A., Brion G. Sustainability and risk assessment matrix (SRAM): pathway to water security. *Water Supply*. 2020; 20(7):2928-2940. DOI: 10.2166/ws.2020.196. EDN EFIJKD.
19. Nesticò A., De Mare G., Maselli G. An economic model of risk assessment for water projects. *Water Supply*. 2020; 20(6):2054-2068. DOI: 10.2166/ws.2020.093. EDN BAYGQZ.
20. Marques J., Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions. *Water Supply*. 2020; 20(3):878-888. DOI: 10.2166/ws.2020.011. EDN HYQRJO.
21. Wang Zh., Wu X., Wang H., Wu T. Prediction and analysis of domestic water consumption based on optimized grey and Markov model. *Water Supply*. 2021; 21(7): 3887-3899. DOI: 10.2166/ws.2021.146. EDN HXXBWZ.
22. Pandey P., Dongre S., Gupta R. Probabilistic and fuzzy approaches for uncertainty consideration in water distribution networks : a review. *Water Supply*. 2020; 20(1):13-27. DOI: 10.2166/ws.2019.141
23. Kalbusch A., Ghisi E. Energy consumption in the life cycle of plumbing fixtures. *Water Supply*. 2019; 19(1):70-78. DOI: 10.2166/ws.2018.053
24. Orlov A.I. *Theory of Decision-Making : textbook*. Moscow, Examen, 2005; 656. (rus.).
25. Certificate of state registration of computer programs No. 2024687562 dated November 20, 2024. *Minimizing risks in the design of urban pipeline systems / Melekhov E.S., Yarygin R.N., Bober V.A.*

Received February 13, 2026.

Adopted in revised form on February 18, 2026.

Approved for publication on March 3, 2026.

**B I O N O T E S :** **Viktor R. Chupin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; ID RSCI: 475565, Scopus: 57199418096, ORCID: 0000-0001-5460-4780; chupinvr@ex.istu.edu;

**Ivanna A. Abrosimova** — postgraduate student of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; senior lecturer of the Department of Mechanization, Automation, and Robotics in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1066562, Scopus: 57194454961, ResearcherID: AAC-2335-2022, ORCID: 0000-0003-4207-4449; abrosimovaia@mgsu.ru;

**Roman N. Yarygin** — postgraduate student of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; chief engineer; **Scientific and Production Enterprise “Gidrix”**; build. 24, 6 Sekerino settlement, Moscow, Russian Federation; yarygin.r@hydrig.ru.

*Author contributions: all authors contributed equally to the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*