



Выявление участков, не позволяющих обеспечить надежное функционирование системы подачи и распределения воды

© Алексей Сергеевич Душин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия,
a.s.dushin@mail.ru

Аннотация. Цель работы – с использованием ранее составленных математических моделей отборов воды (метод сечений), распределения потоков разработать методику выявления участков, не позволяющих системам подачи и распределения воды (СПРВ) качественно выполнять функции снабжения водой потребителей. Для эффективного управления системами важно не только учитывать закономерности отборов воды из СПРВ, вероятностные изменения структуры, но и оценивать влияние на качество работы системы ее отдельных компонентов (участков), их весовой вклад. Для анализа использованы вероятностные узловые показатели надежности водоснабжения потребителей K_j , P_j . Указанные показатели разложены на составляющие компоненты: вероятности нахождения СПРВ в безаварийном, аварийных структурных состояниях (ординарный поток отказов) и вероятности обеспечения потребителей в этих состояниях. С использованием частных показателей K_j^i , P_j^i предложено проводить оценку надежности снабжения потребителей в каждом состоянии. Сравнение частных показателей с нормируемыми значениями позволяет делать выводы о качестве работы каждого участка. С помощью полученных при структурных состояниях частных показателей можно оценивать значимость участков для обеспечения необходимого качества снабжения потребителей, перегруженность участков, оценивать их работу как резервных линий. На примере конкретной системы представлены все шаги предлагаемой методики. Для анализа работы СПРВ обоснована необходимость использования ранее разработанной программы для ЭВМ. Программа позволяет определять для каждого структурного состояния системы частные показатели надежности K_j^i , P_j^i . Предлагаемая методика по выявлению участков, имеющих пропускную способность, не позволяющую СПРВ качественно выполнять функции водоснабжения потребителей, может найти широкое применение при исследовании проектируемых и эксплуатируемых СПРВ.

Ключевые слова: водоснабжение, система подачи и распределения воды, нефиксированный отбор воды, вероятностный характер водопотребления, надежность обеспечения водой потребителей

Для цитирования: Душин А. С. Выявление участков, не позволяющих обеспечить надежное функционирование системы подачи и распределения воды // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 3. С. 326–337. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-326-337>.

Original article

Identification of sections inhibiting the reliable operation of water supply and distribution systems

Aleksei S. Dushin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, a.s.dushin@mail.ru

Abstract. A methodology for identifying sections in water supply and distribution systems (WSDSs) that inhibit high-quality water supply is proposed. The study is based on the previously developed mathematical models of water withdrawal (cross-sectional method) and flow distribution. Effective WSDS management requires not only consideration of water withdrawal patterns from WSDSs and probabilistic structural variations, but also assessment of the impact of individual components (sections) and their weight contribution on the system performance. During the analysis, K_j and P_j probabilistic reliability indicators of water supply to consumers were used. These indicators include the following components: probabilities of WSDS fault-free and emergency structural states (ordinary failure stream) and probabilities of

supplying water to consumers in these states. The reliability of consumer supply in each state is assessed using partial indicators K_j^i and P_j^i . Conclusions about the operational quality of each section can be made by comparing partial indicators with normalized values. Using partial indicators obtained in structural states, it is possible to assess the overburden of sections and their importance for ensuring the necessary quality of consumer supply, as well as to evaluate their backup line operation. An example of a particular system is used to demonstrate all steps of the proposed methodology. The need to use the previously developed software application for analysing the WSDS operation is justified. The software allows partial reliability indicators K_j^i and P_j^i to be determined for each structural state of the system. The proposed methodology for identifying WSDS sections with a capacity inhibiting reliable water supply can be used when designing new or surveying existing WSDSs.

Keywords: water supply, water supply and distribution system, non-fixed water withdrawal, probabilistic nature of water consumption, reliability of water supply to consumers

For citation: Dushin A. S. Identification of sections inhibiting the reliable operation of water supply and distribution systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(3):326-337. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-326-337>.

Введение

Система подачи и распределения воды (далее – СПРВ), как наиболее дорогостоящий, предназначенный для долгой эксплуатации элемент в системе водоснабжения, всегда является объектом пристального внимания соответствующих служб. Существующие методы расчета СПРВ, базирующиеся на детерминированном подходе, не отвечают адекватностью реальным процессам, происходящим в системах, в результате происходит потеря эффективности в работе, нерациональное расходование материальных средств. Работа систем во времени динамична, сопряжена с изменяющимися условиями водопотребления, износом ее элементов (участков)¹ [1–17]. Системы должны быть гибкими в управлении, легко адаптироваться под изменяющиеся условия. Возникает необходимость в поиске приоритетных направлений для улучшения системы, определении элементов сети, ремонт и строительство которых при их финансировании могли бы оказать наибольший экономический эффект. Требуется разработка методика, отражающей учет влияния каждого из элементов (участков) на качество функционирования всей системы. В силу большого количества требуемых вычислений для любых схем должен быть использован специально созданный математический аппарат. Адаптация разрабатываемой методики под программы для ЭВМ неизбежна.

Цель исследования – с использованием ранее составленных математических моделей отборов воды (метод сечений), распределения потоков разработать методику выявления участков, не позволяющих СПРВ качественно выполнять функции снабжения водой потребителей.

Методы

Для более эффективного управления системой подачи воды, более качественного обеспечения потребителей необходимо выявлять в этой системе элементы, в данном случае участки, находящиеся в перегруженном состоянии, выявлять участки, имеющие низкую пропускную способность, слабые возможности к выполнению функций резервных линий или не способные к выполнению этих функций вообще.

Модель вероятностных отборов воды потребителями. В основе метода лежат ранее разработанная модель вероятностных отборов воды и распределений потоков с использованием α -сечений, методика оценки надежности обеспечения потребителей, вероятностные узловые показатели надежности. Ранее разработанные материалы подробно изложены в статьях [12–14]. В общих чертах можно представить каждый узел отбором воды большой группы потребителей.

На рис. 1 изображена плотность распределения вероятности узлового отбора воды по часу.

¹Венцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.;

Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. М.: Наука, 1979. 496 с.;

Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.;

Соболь И. М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 311 с.

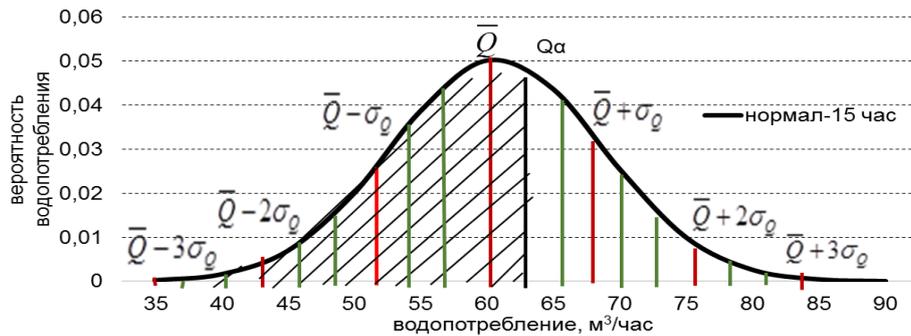


Рис. 1. Плотность распределения вероятности узлового отбора воды часа t
 Fig. 1. Probability density distribution of nodal water withdrawal of hour t

В соответствии с правилом трех сигм распределение узловых отборов по каждому часу t рассматривается в пределах 3-х среднеквадратических отклонений, в пределах $[\bar{Q}_{j,t} - 3 \cdot \sigma_{j,t}, \dots, \bar{Q}_{j,t} + 3 \cdot \sigma_{j,t}]$, где $\bar{Q}_{j,t}$ – математическое ожидание отбора, $\sigma_{j,t}$ – среднеквадратическое отклонение отбора. Распределение вероятности водопотребления рассекается на несколько k равных интервалов $[\alpha_s - 1; \alpha_s]$ с размером каждого $\sigma_{j,t}/3$. Узловой отбор по α_s -сечению:

$$Q_{j,\alpha_s,t} = \bar{Q}_{j,t} - 3 \cdot \sigma_{j,t} + \alpha_s \cdot \sigma_{j,t}/3.$$

Часовые распределения потоков воды по участкам сети в соответствии с системами уравнений:

- 1) безаварийный режим (без изменения структуры сети);
- 2) аварийные режимы (отключение участков СПРВ при ординарном потоке отказов i $[1, \dots, n]$).

$$\begin{cases} AX_{\alpha_s,t} = Q_{\alpha_s,t} \\ A^T P_{\alpha_s,t} = SX_{\alpha_s,t}^2 - H_t \end{cases} \quad \begin{cases} A_{ав} X_{\alpha_s,t} = Q_{\alpha_s,t} \\ A_{ав}^T P_{\alpha_s,t} = SX_{\alpha_s,t}^2 - H_t \end{cases}$$

$$K_j = \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\rho_{j,t,безав}^{обеспечения} \cdot \rho_0 + \sum_{i=1}^n (\rho_{j,t,i}^{обеспечения} \cdot \rho_{откл,i}) \right); \quad P_j = \exp \left(-\frac{1}{24} \cdot \rho_0 \cdot \sum_{t=1}^{24} \sum_{d=1}^n \lambda_d \cdot l_d \cdot \tau_{j,t} \right),$$

где λ – интенсивность отказов участка, $1/(\text{км} \cdot \text{год})$; l – длина участка, км; $\tau_{j,d}$ – продолжительность обеспечения потребителя j водой

$$\tau_{j,d} = T \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} (1 - \rho_{j,t}^{обеспечения}) = T \cdot \frac{1}{24} \cdot \left(24 - \sum_{t=1}^{24} \rho_{j,t}^{обеспечения} \right) = T \cdot \left(1 - \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \rho_{j,t}^{обеспечения} \right),$$

где T – продолжительность исследуемого периода, год; $\rho_{j,t}^{обеспечения}$ – вероятность часового обеспечения j -го потребителя, при $\bar{q}_{j,k} \geq \varphi_k^{аб}, k \in F_j^k$, где $\bar{q}_{j,k}$ – относительный (к расчетному расходу) часовой расход воды у j -го потребителя при отказе j -го элемента

где t – время (час); α_s $[0, \dots, 18]$ – сечения; A – $(m-1) \cdot n$ – матрица соединений узлов и ветвей расчетной схемы; $A_{ав}$ – усеченные матрицы A ; X – n – вектор расходов на ветвях расчетной схемы; H – n – вектор действующих напоров на ветвях; P – $(m-1)$ – мерный вектор узловых давлений; Q – $(m-1)$ – мерный вектор узловых отборов с элементами Q_j :

$$Q_j = \begin{cases} Q_j^*, & \text{если } P_j \geq P_j^*, \\ Q_j(P_j), & \text{если } Z_j < P_j < P_j^*, \\ 0, & \text{если } P_j \leq Z_j, \end{cases}$$

где j – номер узла; Q_j^* – требуемый узловой отбор; P_j^* – требуемый узловой свободный напор, м; Z_j – геодезическая отметка поверхности земли, м.

Качество работы СПРВ оценивается показателями расчетного и пониженного уровня обеспечения потребителей: K_j – коэффициент готовности к обеспечению расчетного водоснабжения j -го потребителя, P_j – вероятность безотказного водоснабжения j -го потребителя.

Методика формирования показателей K_j, P_j изложена в статьях [12–14]. Основные ее моменты представлены ниже.

ниже минимально допустимого значения; d – множество элементов СПРВ, выход которых в аварию нарушает пониженный уровень водоснабжения j -го потребителя.

кольцевой части сети; F_j^k – множество участков кольцевой части водопроводной сети, гидравлически связанных с j -м потребителем; $\varphi_k^{аб}$ – норма подачи воды потребителям в аварийных ситуациях. Вероятность обеспечения потребителей представлена

преобразованиями Лапласа (нормальный закон распределения):

$$p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}} = 0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right),$$

где α_s – сечение. $p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}}$ определяется в пределах $[0, \dots, \alpha_s]$.

$$K_j = \prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)^{-1} \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right) \right) + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right) \right) \right) =$$

$$= \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i}{\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)} \right) \cdot \left(\frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right) \right) \right) \right).$$

$p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}}$ при $Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} = Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$

$$P_j = \exp\left(-\left[\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n d \in D_j \lambda_i \cdot l_i \cdot \left(T \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} (1 - \rho_{j,t})\right)\right]\right) =$$

$$= \exp\left(-\left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot l_i \cdot T}{\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right)\right)\right)\right]\right).$$

$p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}}$ при $Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} \geq 0,7 \cdot Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$

На основе сопоставления сформированных показателей надежности снабжения водой потребителей с нормируемыми значениями: $K_j \geq K_j$ (норм); $P_j \geq P_j$ (норм) – делается вывод о надежности СПРВ. Вероятность необеспечения j -го потребителя требуемым количеством воды: $(1 - K_j)$ (норм) – нормируемая; $(1 - K_j)$ – расчетная. Вероятность необеспечения j -го потребителя аварийным (минимально допустимым) количеством воды: $(1 - P_j)$ (норм) – нормируемая; $(1 - P_j)$ – расчетная.

Формируются выражения:

$$N_K = \frac{1 - K_j}{1 - K_j(\text{норм})}; \quad N_P = \frac{1 - P_j}{1 - P_j(\text{норм})}.$$

Они наглядно указывают, во сколько раз увеличен риск некачественного снабжения j -го потребителя по отношению к требуемому уровню.

При выполнении каких-либо мероприятий, направленных на повышение качества снабжения потребителей, их действие можно оценить выражениями:

$$N_{KM} = \frac{1 - K_j(\text{до})}{1 - K_j(\text{после})}; \quad N_{PM} = \frac{1 - P_j(\text{до})}{1 - P_j(\text{после})}.$$

Мероприятий по повышению надежности снабжения потребителей – большое количество: связанных со структурным изменением СПРВ, с увеличением напора на источнике или участках и т.д.

Выбор того или иного мероприятия, их комплексного использования должен согласовываться с дополнительным объемом финансовых вложений, эффектом от их выполнения.

Результаты и их обсуждение

Составление методики выявления участков, не позволяющих СПРВ качественно снабжать водой потребителей

Вероятность нахождения СПРВ в структурных состояниях (в безаварийном состоянии и при ординарном потоке отказов $i [1, \dots, n]$, где $n + 1$ – количество структурных состояний) представлена выражениями:

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot l_i \cdot T}{\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)} \right) \cdot \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i}{\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)} \right).$$

Выражения являются коэффициентами весомости каждого состояния. Для оценки влияния каждого элемента (участка) на качество функционирования всей системы необходимо общие показатели надежности разложить на составляющие компоненты – частные показатели K_j^i, P_j^i в каждом i -м структурном состоянии СПРВ.

$$K_j^i = \left(\frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right) \right) \right) \right).$$

$$p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}} \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} = Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$$

$$P_j^i = \exp\left(-\left[\left(1 - \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \frac{\alpha_s}{3}\right)\right)\right)\right]\right)$$

$$p_{j,\alpha_s,t}^{\text{обеспечения}} \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} \geq 0,7 \cdot Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$$

Формируются табл. 1, 2 частных показателей.

По результатам сравнения между собой показателей K_j^i , P_j^i при разных структурных состояниях СПРВ, их сопоставления с

нормируемыми значениями делаются соответствующие выводы. Дополнительным анализом может являться оценка перегруженности участков СПРВ. По сечениям производятся распределения потоков воды по участкам по часу максимального потребления, определяются диапазоны распределения расходов воды по ветвям X_i , диапазоны возможных скоростей V_i , $[V_{min}, \dots, V_{max}]$, удельных потерь напора $\Delta h_i / L_i$ $[\Delta h_{min}, \dots, \Delta h_{max}]$ по участкам. Результаты сводятся в табл. 3, 4.

Таблица 1. Определение частных показателей K_j^i при каждом i -м состоянии системы подачи и распределения воды

Table 1. Determination of partial indicators K_j^i for each i -th state of the water supply and distribution system

Узел j /участок i	$K_{j, \text{норм}}$	Наименование участков		
		1	...	n
1	$K_{1, \text{норм}}$	K_1^1	K_1^i	K_1^n
...	$K_{j, \text{норм}}$	K_j^1	K_j^i	K_j^n
m	$K_{m, \text{норм}}$	K_m^1	K_m^i	K_m^n

Таблица 2. Определение частных показателей P_j^i при каждом i -м состоянии системы подачи и распределения воды

Table 2. Determination of private indicators P_j^i for each i -th state of the water supply and distribution system

Узел j /участок i	$P_{j, \text{норм}}$	Наименование участков		
		1	...	n
1	$P_{1, \text{норм}}$	P_1^1	P_1^i	P_1^n
...	$P_{j, \text{норм}}$	P_j^1	P_j^i	P_j^n
m	$P_{m, \text{норм}}$	P_m^1	P_m^i	P_m^n

Таблица 3. Определение диапазона распределения скоростей движения воды V , м³/с, по участкам сети

Table 3. Determination of the range of distribution of water flow velocities V , м³/s, by network sections

Сечения	Отключение участков i		
	1	...	n
0	V_1^{min}	V_i^{min}	V_n^{min}
...	$V_1 \dots$	$V_i \dots$	$V_n \dots$
18	V_1^{max}	V_i^{max}	V_n^{max}

Таблица 4. Определение диапазона распределения удельных потерь напора $\Delta h_i / L_i$, м³/с, по участкам сети

Table 4. Determination of the range of distribution of specific pressure losses $\Delta h_i / L_i$, м³/s, by network sections

Параметры		Отключение участков i		
		1	...	n
Длина, м		L_1	L_i	L_n
Сечения	0	$\Delta h_1^{min} / L_1$	$\Delta h_i^{min} / L_i$	$\Delta h_n^{min} / L_n$
	...	$\Delta h_1 / L_1$	$\Delta h_i / L_i$	$\Delta h_n / L_n$
	18	$\Delta h_1^{max} / L_1$	$\Delta h_i^{max} / L_i$	$\Delta h_n^{max} / L_n$

Приведем пример. Рассмотрена СПРВ кольцевой структуры, состоящей из 6 узлов и 7 участков (рис. 2). Отборы воды каждым узлом представлены на рис. 3. Проведено моделирование аварийных отключений участков СПРВ (рис. 4).

Для определения вероятности нахождения СПРВ в безаварийном и аварийных состояниях принят ряд допущений: материал трубопровода – сталь, период эксплуатации –

нормальный (интенсивность отказов трубопровода, соответствующая периоду нормальной эксплуатации, $1/(км \cdot ч)$), $\lambda_i = 0,064 \cdot D_i^{-0,8}$, где D_i – диаметр участка i , м; время восстановления $T_{вс}$ участка i составляет 24 часа; $\mu_{вс} = 8760 / 24 = 365$ (1/год).

Результаты определения вероятности нахождения СПРВ в безаварийном состоянии и состоянии ординарного потока отказов представлены в табл. 5.

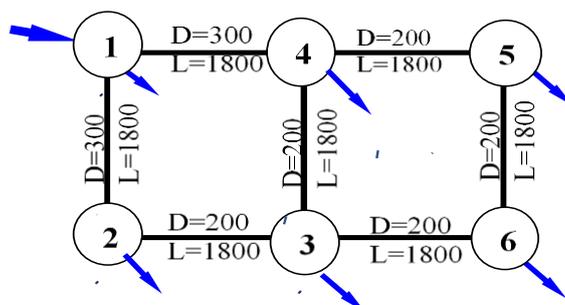


Рис. 2. Кольцевая схема системы подачи и распределения воды

Fig. 2. Ring diagram of the water supply and distribution system

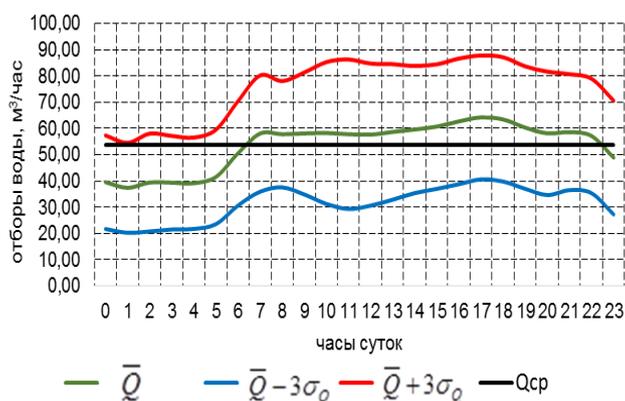


Рис. 3. Диапазоны суточного изменения отборов воды одним узлом

Fig. 3. Ranges of daily change in water withdrawals by one node

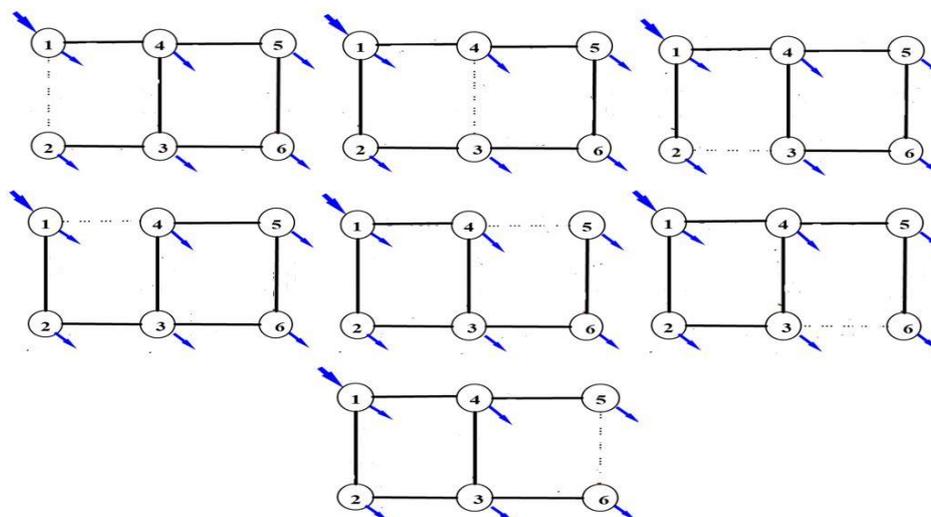


Рис. 4. Моделирование аварийных отключений участков системы подачи и распределения воды

Fig. 4. Modeling of emergency shutdowns of sections of the water supply and distribution system

Таблица 5. Определение вероятности нахождения системы подачи и распределения воды в безаварийном и аварийных состояниях

Table 5. Determination of the probability of finding a water supply and distribution system in accident-free and emergency states

Параметры	L, м	D, мм	λ	$\lambda \cdot L$	μ	γ	$1 + \gamma$	$\rho_{ae} = \gamma / \Pi (1 + \gamma)$	
Отключаемые участки	1-2	1800	300	0,1677	0,3018	365	0,00083	1,00083	0,00082
	2-3	1800	200	0,2319	0,4175	365	0,00114	1,00114	0,00095
	4-3	1800	200	0,2319	0,4175	365	0,00114	1,00114	0,00095
	1-4	1800	300	0,1677	0,3018	365	0,00083	1,00083	0,00082
	4-5	1800	200	0,2319	0,4175	365	0,00114	1,00114	0,00095
	3-6	1800	200	0,2319	0,4175	365	0,00114	1,00114	0,00095
	5-6	1800	200	0,2319	0,4175	365	0,00114	1,00114	0,00095
$\Pi (1 + \gamma)$							1,00740	–	
$\rho_0 = 1 / \Pi (1 + \gamma)$							0,99266	0,00732	

Формирование обобщенных показателей надежности снабжения потребителей K_j и P_j

Результаты указаны графически на рис. 5 (красным цветом выделены показатели надежности до проведения мероприятий, зеленым цветом – после проведения мероприятий). Сформированные показатели при сопоставлении с нормируемыми значениями: $K_j \geq 0,99178$; $P_j \geq 0,99998$ – указывают на проблемы

водоснабжения узлов 3, 4, 5, 6. Согласно ранее разработанной и представленной в статье [14] методике при $K_j > K_j (норм)$ и $P_j < P_j (норм)$ должна быть предусмотрена перекладка участков с повышенным диаметром.

Оценка влияния каждого i-го участка на качество функционирования системы

Результаты определения частных показателей, рассчитываемых по предлагаемой методике, представлены в табл. 6, 7.

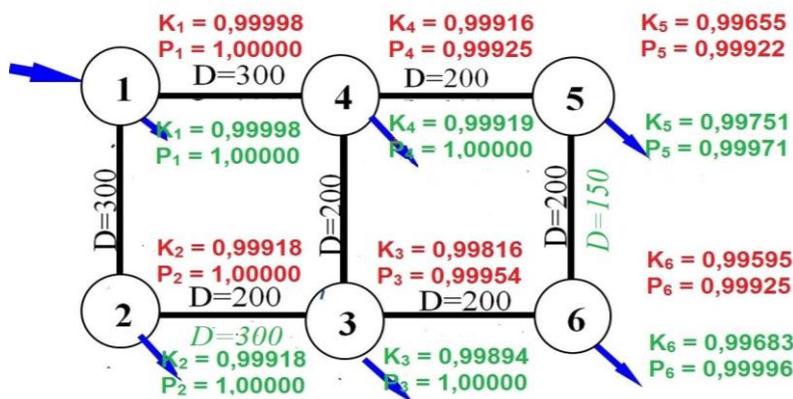


Рис. 5. Распределение узловых показателей надежности до и после проведения мероприятий
Fig. 5. Distribution of nodal reliability indicators before and after the events

Частные показатели надежности K_j^i и P_j^i указывают на особенно низкое качество снабжения удаленных потребителей при отключении участка 1-4. В данном случае вероятность обеспечения узлов-потребителей 3-6 расчетным (требуемым) количеством воды полностью отсутствует, значительно низкая вероятность безотказного снабжения этих потребителей. Данное обстоятельство объясняется отсутствием достаточной пропускной способности резервной линии 2-3. Участок не может пропустить в минимально допустимых (аварийных) пределах объема воды для обеспечения

указанных потребителей (рис. 6). Соответственно, требуется увеличение диаметра участка 2-3 с 200 мм до 300 мм. Показательным является час максимального водопотребления. По указанному часу на рис. 7 представлены диапазоны распределения скоростей движения воды по участкам при возможных структурных состояниях сети (отключении аварийных участков). Диапазоны распределения скоростей по участкам указывают, что все участки, кроме 5-6, имеют достаточную загруженность (установленный по схеме диаметр 200 мм на участке 5-6 завышен, достаточно 150 мм).

Таблица 6. Определение частных показателей K_j^i при каждом i -м состоянии системы подачи и распределения воды

Table 6. Determination of partial indicators K_j^i for each i -th state of the water supply and distribution system

Параметры		Отключение участков i						Безаварийный режим	
		1-2	2-3	1-4	4-3	4-5	3-6		5-6
ϕ , мм		300	200	300	200	200	200	200	–
$R_{отключ}$		0,00082	0,00095	0,00082	0,00095	0,00095	0,00095	0,00095	0,99266
Участок i / узел j	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0,03370	1	1	1	1	1	1	1
	3	0,06253	0,80658	0,00000	0,99984	1	1	1	1
	4	1	1	0,00000	1	1	1	1	1
	5	0,17079	0,80658	0,00000	0,99984	0,00477	0,49796	1	1
	6	0,06146	0,69279	0,00000	0,99806	0,05910	0,10957	1	1

Таблица 7. Определение частных показателей P_j^i при каждом i -м состоянии системы подачи и распределения воды

Table 7. Determination of private indicators P_j^i for each i -th state of the water supply and distribution system

Параметры		Отключение участков i						Безаварийный режим	
		1-2	2-3	1-4	4-3	4-5	3-6		5-6
ϕ , мм		300	200	300	200	200	200	200	–
Участок i / узел j	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	0,56934	1	1	1	1	1
	4	1	1	0,40146	1	1	1	1	1
	5	1	1	0,38998	1	0,99593	1	1	1
	6	1	1	0,40146	1	1	1	1	1

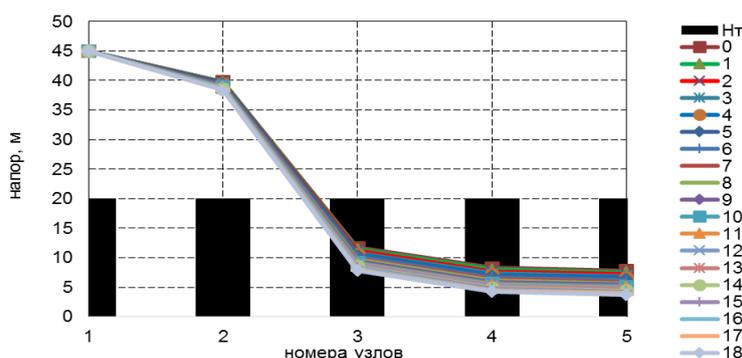


Рис. 6. Распределение располагаемого напора по узлам 1 – 2 – 3 – 4 – 5 в час максимального водопотребления при отключении участка 1-4

Fig. 6. Distribution of available pressure by nodes 1 – 2 – 3 – 4 – 5 per hour of maximum water consumption when section 1-4 is turned off

Диапазон распределения скоростей движения воды по участку 2-3 при отключении участка 1-4 в пределах 1,5 м/с указывает на его высокую перегруженность.

Результаты мероприятий по увеличению диаметра участка 2-3 с 200 мм до 300 мм и

снижению диаметра участка 5-6 с 200 мм до 150 мм представлены узловыми показателями надежности на рис. 5, 8, 9 (красным цветом выделены показатели надежности до проведения мероприятий, зеленым цветом – после проведения мероприятий).

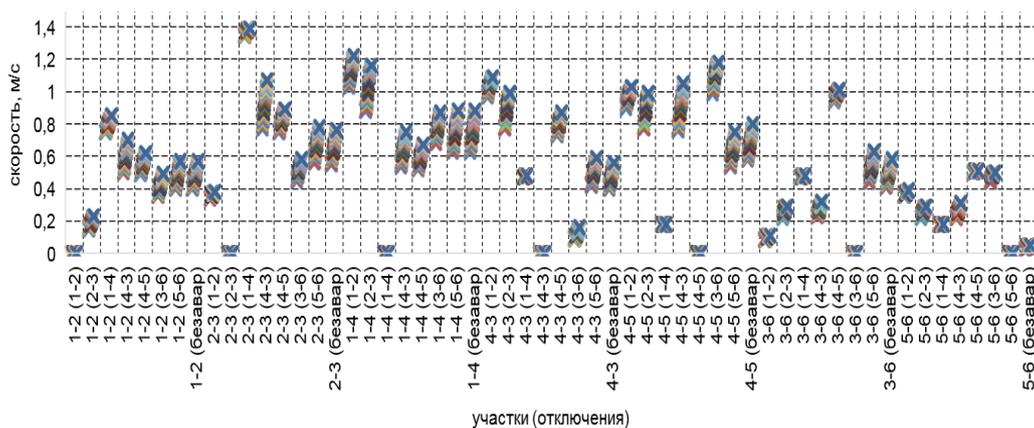


Рис. 7. Распределение диапазона скоростей движения воды по участкам системы подачи и распределения воды в час максимального потребления при возможных отключениях
Fig. 7. Distribution of the range of water flow rates by sections of the water supply and distribution system at the hour of maximum consumption with possible shutdowns

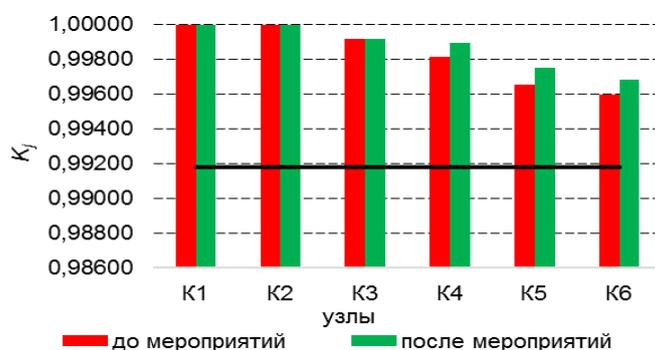


Рис. 8. Распределение обобщенных K_j по узлам до и после проведения мероприятий
Fig. 8. Distribution of generalized K_j over nodes before and after events

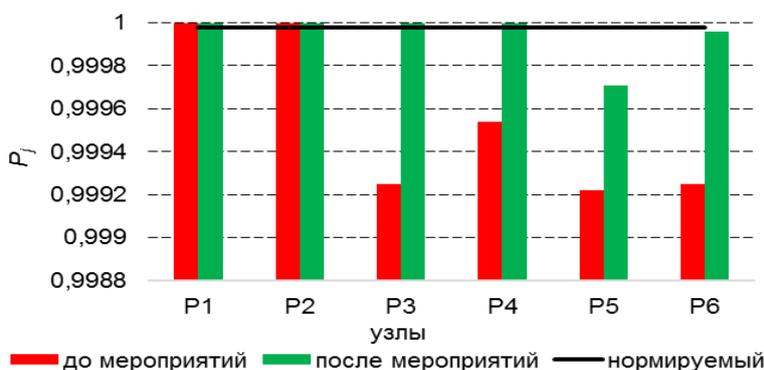


Рис. 9. Распределение обобщенных P_j по узлам до и после проведения мероприятий
Fig. 9. Distribution of generalized P_j over nodes before and after events

Показатель N_{PM} указывает, что проведение мероприятий в разы увеличивает безотказность водоснабжения узлов-потребителей 5, 6, практически полностью исключает риск некачественного снабжения узлов 3, 4 (табл. 8). Создание СПРВ, соответствующих современным требованиям надежности, как правило, сопровождается повышенным объемом финансовых вложений в строительство и эксплуатацию. СПРВ, созданная с учетом

использования предлагаемой методики, позволит высококачественно обеспечивать потребителей, в том числе удаленных, при незначительном увеличении дополнительных финансовых вложений, в данном случае менее 1 % (рис. 10):

$$(21885+354) \cdot 100 / (21690+354) = 0,9 \%$$

Разработанная методика позволяет повысить гибкость, управляемость СПРВ, готовность к выполнению своих основных функций

– функций качественного снабжения потребителей. Выполнение подобного рода задач даже для маленьких схем ручным способом практически невозможно. Сложность и разносторонность решений требует использования математического аппарата. Ранее на кафедре городского строительства и хозяйства

Иркутского национального исследовательского технического университета была разработана, внесена в Реестр программ для ЭВМ (Роспатент), проведена практическая апробация программы для ЭВМ «Программа по оценке надежности обеспечения потребителей водой»².

Таблица 8. Сопоставление результатов выполнения мероприятий
Table 8. Comparison of the results of the implementation of activities

Узлы	Превышение расчетного K_j над нормируемым N_K (до мероприятий), разы	Превышение расчетного K_j над нормируемым N_K (после мероприятий), разы	N_{KM} (эффект мероприятий), разы	Превышение расчетного P_j над нормируемым N_P (до мероприятий), разы	Превышение расчетного P_j над нормируемым N_P (после мероприятий), разы	N_{PM} (эффект мероприятий), разы
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	37,5	-	-
4	-	-	-	23	-	-
5	-	-	-	39	14,5	2,68
6	-	-	-	37,5	2	18,75

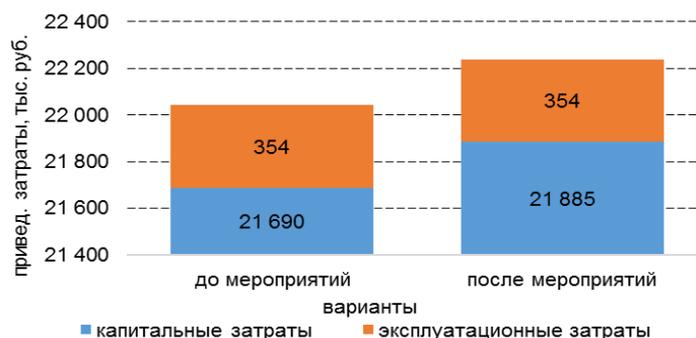


Рис. 10. Распределение приведенных затрат до и после проведения мероприятий
Fig. 10. Distribution of the reduced costs before and after the activities

Заключение

Предлагаемая методика анализа и программа для ЭВМ учитывают многообразие режимов работы СПРВ, позволяют разносторонне подойти к анализу функционирования всей системы и ее отдельных элементов, участков. Использование указанной

программы позволяет проводить подобные анализы систем без особых усилий.

Базируясь на результатах такого анализа, легче разрабатывать адекватные эффективные мероприятия по решению возможных проблем некачественного функционирования СПРВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Душин А. С., Чупин Р. В., Майзель И. В. Комплексное моделирование случайных процессов водопотребления и возникновения аварийных ситуаций в водопроводных сетях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2012. № 2 (3). С. 76–83.

2. Чупин В. Р., Душин А. С., Чупин Р. В. Моделирование процессов водопотребления и возникновения аварийных ситуаций в системах подачи и распределения воды // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 10 (69). С. 130–136.

²Чупин В. Р., Душин А. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615619 от 27 мая 2020 г.

3. Чупин Р. В., Майзель И. В., Душин А. С., Чупин В. Р. Нормирование расчетных удельных значений потребления воды и сброса стоков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4 (15). С. 171–191.
4. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения. М.: Стройиздат, 1979. 232 с.
5. Карамбилов С. Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. М.: МГУП, 2004. 197 с.
6. Карамбилов С. Н., Бекишева Л. Б. О некоторых статистических закономерностях водопотребления в системах водоснабжения // Природообустройство. 2012. № 4. С. 45–48.
7. Карамбилов С. Н., Буркова Ю. Г. Анализ и синтез сложных инженерных систем с применением современных математических методов: монография. М.: РГАУ-МСХА, 2015. 193 с.
8. Карамбилов С. Н., Мордясов М. А., Буркова Ю. Г. Применение кластерного анализа и нейронных сетей для анализа качества функционирования инженерных сетей в штатных и послеаварийных условиях // Природообустройство. 2014. № 3. С. 63–66.
9. Шопенский Л. А., Юрьева И. П. Построение расчетных графиков водопотребления // Водоснабжение и санитарная техника. 1985. № 11. С. 25–27.
10. Шопенский Л. А. Аналитическое описание режимов водопотребления и построения расчетных графиков: сб. научных трудов. Вып. I. М.: ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1975.
11. Карамбилов С. Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. М.: МГУП, 2004. 196 с.
12. Чупин Р. В., Душин А. С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 12. С. 35–44.
13. Чупин В. Р., Душин А. С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой. Разработка показателей надежности водоснабжения потребителей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 578–593. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-578-593>.
14. 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 (31). С. 790–803. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-790-803>.
15. Евдокимов А. Г., Дубровский В. В., Тевяшев А. Д. Потокораспределение в инженерных сетях. М.: Стройиздат, 1979. 200 с.
16. Чупин Р. В., Мелехов Е. С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. Иркутск: ИрГТУ, 2011. 323 с.
17. Чупин В. Р., Малевская М. Б. Выработка рекомендаций по минимизации последствий от аварийных ситуаций в системах водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 4. С. 8–9.
18. 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 (36). С. 112–125. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-112-125>.

REFERENCES

1. Dushin AS, Chupin RV, Maizel IV. Complex modeling of random water use processes and accidental situations in water-supply systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2012;2(3):76-83. (In Russ.).
2. Chupin VR, Dushin AS, Chupin RV. Modeling water consumption and emergencies in water supply and distribution systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;10(69):130-136.
3. Chupin RV, Maizel IV, Dushin AS, Chupin VR. Calculation rating of specific values of water consumption and effluent discharge. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2015;4(15):171-191. (In Russ.).
4. Abramov NN. Reliability of water supply systems. Moscow: Stroizdat; 1979. 232 p. (In Russ.).
5. Karambirov SN. Mathematical modeling of water supply and distribution systems under conditions of multi-mode and uncertainty: monograph. Moscow: MSUPA; 2004. 197 p. (In Russ.).
6. Karambirov SN, Bekisheva LB. About some statistical regularities of water consumption in water supply systems. *Prirodoobustroistvo*. 2012;4: 45-48. (In Russ.).
7. Karambirov SN. Analysis and synthesis of complex engineering systems using modern mathematical methods: monograph. Moscow: RSAU-MTAA; 2015. 193 p. (In Russ.).

8. Karambirov SN, Mordyasov MA, Burkova YuG. Usage of cluster analysis and neural networks for the analysis of the quality of engineering networks functioning under normal and postemergency states. *Prirodoobustroistvo*. 2014;3:63-66. (In Russ.).
9. Shopenskii LA, Yur'eva IP. Construction of calculated water consumption schedules. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1985;11:25-27. (In Russ.).
10. Shopenskii LA. Analytical description of water consumption modes and construction of calculated graphs: collection of scientific papers. Vol. 1. Moscow: ONTI TsNIIEP inzhenernogo oborudovaniya; 1975. (In Russ.).
11. Karambirov SN. Mathematical modeling of water supply and distribution systems under conditions of multi-mode and uncertainty: monograph. Moscow: MSUPA; 2004. 197 p. (In Russ.).
12. Chupin RV, Dushin AS. Assessment of the customer water supply reliability. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2017;12:35-44. (In Russ.).
13. Chupin VR, Dushin AS. Assessment of the reliability of water supply to consumers: water supply reliability indicators. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(3):578-593. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-578-593>.
14. Chupin VR, Dushin AS. Parameter optimisation for new and reconstructed systems of water supply and distribution for ensuring consumer's uninterrupted water supply. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = 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>.
15. Evdokimov AG, Dubrovskii VV, Tevyashev AD. Flow distribution in engineering networks. Moscow: Stroizdat; 1979. 200 p. (In Russ.).
16. Chupin RV, Melekhov ES. Development of the theory and practice of modeling and optimization of water supply and sanitation systems. Irkutsk: ISTU; 2011. 323 p. (In Russ.).
17. Chupin VR, Malevskaya MB. Development of recommendations to minimize the consequences of emergencies in water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 1994;4:8-9. (In Russ.).
18. Chupin VR, Dushin AS. Assessment and improvement of the operational reliability of the water supply and distribution system in the Irkutsk-II microdistrict of the Irkutsk city. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = 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>.

Информация об авторе

А. С. Душин,
инженер-строитель,
ООО «Сетевая компания «ИРКУТ»»,
664020, г. Иркутск, ул. Авиастроителей, 28А,
Россия,
<https://orcid.org/0000-0001-7307-5167>

Information about the author

Aleksei S. Dushin,
Civil engineer,
Network company "IRKUT" LTD,
28A Aviastroiteley St., Irkutsk, 664020, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-7307-5167>

Вклад автора

Душин А. С. провел исследование, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Dushin A. S. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022.
Одобрена после рецензирования 09.08.2022.
Принята к публикации 10.08.2022.

The article was submitted 19.07.2022.
Approved after reviewing 09.08.2022.
Accepted for publication 10.08.2022.