Научная статья
УДК 628.144.2
https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-546-559

Определение приоритетных направлений по обеспечению надежной и эффективной работы существующих систем подачи и распределения воды

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

Аннотация. Целью является разработка методики поиска приоритетных направлений для обеспечения и дальнейшего поддержания надежности и эффективности работы существующих систем подачи и распределения воды на требуемом уровне на основе ранее сформированных математических моделей отбора воды (метод сечений) и распределения потоков. Основной задачей, стоящей перед организациями, эксплуатирующими системы подачи и распределения воды, является качественное снабжение потребителей водой. Независимо от изношенности систем подачи и распределения воды, а также изменения их структурного состояния, потребителю вода должна поступать в необходимом количестве и с установленными в соответствии с режимом параметрами. Моделирование работы систем подачи и распределения воды, учитывающее многообразие возможных режимов, указывает на широкий диапазон возможного поведения системы, например, низкое качество снабжения потребителей при безаварийной работе системы, отсутствие влияния отключений некоторых участков на качество снабжения потребителей. Необходим глубокий анализ с привлечением математического аппарата. При составлении математических моделей использованы вероятностные узловые показатели надежности водоснабжения потребителей – K_j и P_j, разложенные на составляющие компоненты, характеризующие изношенность элементов (участков) системы и надежность снабжения потребителей в каждом ее отдельном структурном состоянии. Оценивается необходимость корректировки параметров системы для обеспечения требуемого уровня надежности ее работы, намечаются возможные варианты решений. Технико-экономическое сравнение возможных мероприятий позволяет определить оптимальный вариант, расставить приоритеты по замене устаревших и строительству дополнительных элементов (участков) системы. На примере системы представлены все этапы предлагаемой методики, которая может найти широкое применение у организаций, занимающихся эксплуатацией систем подачи и распределения воды.

Ключевые слова: водоснабжение, система подачи и распределения воды, качество функционирования систем подачи и распределения воды, многорежимность работы, надежность водоснабжения потребителей, узловые показатели надежности, изношенность водопроводных сетей, моделирование работы систем подачи и распределения воды

Для цитирования: Душин А. С. Определение приоритетных направлений по обеспечению надежной и эффективной работы существующих систем подачи и распределения воды // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 4. С. 546–559. https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-546-559.

Original article

Identification of priority areas for ensuring reliable and efficient operation of existing water supply and distribution systems

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

© Душин А. С., 2022

Abstract. This paper addresses a method for determining priority areas for ensuring and maintaining the sufficient reliability and efficiency of existing water supply and distribution systems, based on previously obtained mathematical models of water sampling (cross-section method) and flow distribution. The main task of the organisations, operating water supply and distribution systems, involves a high-quality water supply to consumers. Regardless of the wear of water supply and distribution systems, as well as changes in their structural state, the water having suitable parameters must be supplied to the consumer in the required quantity. Given the variety of regimes, modelling the operation of water supply and distribution systems indicates a wide range of their possible behaviour, for example, poor quality of supply to consumers during trouble-free operation or no impact of shutdowns of some sections on the quality of supply. It is necessary to analyse the systems and model their operation regimes using a mathematical tool. Here, probabilistic nodal reliability indices of water supply to consumers were used in mathematical models. They include Kj and Pj, decomposed into components characterising the wear of elements (sections) in the system and the reliability of supply to consumers in each of its structural states. The need to adjust the system parameters to ensure the required level of reliability of its operation was assessed, with various solutions being outlined. The technical and economical comparison of possible measures allows an optimum option to be determined, prioritising the replacement of outdated elements and the construction of additional elements (sections) of the system. All stages of the suggested method, which can be widely used by organisations, maintaining water supply and distribution systems, are shown in the example of a system.

Keywords: water supply, water supply and distribution system, quality of functioning of water supply and distribution systems, multi-mode operation, reliability of water supply to consumers, nodal reliability indicators, deterioration of water supply networks, modeling of water supply and distribution systems

For citation: Dushin A. S. Identification of priority areas for ensuring reliable and efficient operation of existing water supply and distribution systems. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(4):546-559. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-546-559.

ВВЕДЕНИЕ

Качественное оказание услуг по снабжению потребителей водой – основная задача коммунальных служб, для выполнения которой грамотно должна быть организована работа по оперативному и техническому обслуживанию систем подачи и распределения воды (СПРВ), что требует большого объема финансовых вложений. Именно в период эксплуатации дополнительно приходится расплачиваться за просчеты и нарушения, допущенные на стадии проектирования. Работа системы становится неэффективной, не отвечающей на предъявляемые к ней требования надежности. Сложность поставленной задачи доставляет динамичность работы СПРВ, так как система функционирует в условиях изменяющегося водопотребления, износа элементов (участков). Многообразие возможных комбинаций отборов воды из системы, их вероятностная составляющая, возможные изменения структуры системы в связи с отключениями, выводом в ремонт ее элементов (аварийных участков) определяют качество снабжения водой подключенных абонентов. Решению серьезной проблемы должен помочь накопленный опыт[1] [1–19]: понимание происходящих в системе процессов, их математическое описание, учет закономерностей. Компьютерные технологии, разработка специально создаваемого математического аппарата станут инструментом в этом решении. Требуется разработка методики, которая позволила бы эксплуатирующим СПРВ организациям самостоятельно разрабатывать эффективные мероприятия по повышению качества функционирования системы, снижению рисков нанесения возможных ущербов.

Целью является разработка методики поиска приоритетных направлений для обеспечения и дальнейшего поддержания надежности и эффективности работы существующих систем подачи и распределения воды на требуемом уровне на основе ранее сформированных математических моделей отбора воды (метод сечений) и распределения потоков.

МЕТОДЫ

Как и любая другая система, СПРВ подвержена износу и старению, возникающие при этом аварии приводят к дополнительной нагрузке на систему, а с момента переключений – и вовсе к изменению структуры. Оценка

[1]Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. М.: Наука, 1979. 496 с.

качества снабжения потребителей должна производиться с учетом износа стареющих элементов. На текущий момент основным показателем, указывающим на аварийность работы систем в связи с изношенностью ее участков, является λ – интенсивность отказов, [1/(км·год)]. Чем выше срок службы участков, тем выше указанный показатель $\lambda = f(t)$. Показатель λ зависит от множества составляющих: от диаметра, материала участка сети, давления в сети, свойств грунта и других условий эксплуатации. Согласно литературным источникам[2], интенсивность отказов ***i***-го участка тепловых сетей определяется в соответствии с формулой

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot (0{,}1 \cdot \tau_i^{экпл})^{\alpha_i - 1}, \qquad (1)$$

где i – номер участка тепловой сети; λ_i – интенсивность отказов i-го участка тепловой сети, 1/(км·год); λ_0 – интенсивность отказов теплопровода, соответствующая начальному периоду эксплуатации, 1/(км·год); $T_i^{экп}$ – продолжительность эксплуатации участка, лет; α_i – коэффициент, учитывающий продолжительность эксплуатации i-го участка теплопровода. Для оценки изношенности водопроводных сетей указанная математическая модель также могла бы найти применение.

В СПРВ работа каждого участка поразному оказывает влияние на качество снабжения водой узлов-потребителей: от практически не имеющих влияния до влияния на их значительное количество.

Возникает вопрос о приоритетном выборе направляемых на перекладку изношенных участков. Есть резон в первую очередь производить замену участков, вносящих наибольший вклад в качество работы системы. Возможно другое развитие событий: аварий на сетях может не наблюдаться, но качество снабжения потребителей при этом будет низким. К такому последствию могут привести неверно подобранные на стадии проектирования параметры и структура системы. На снижение качества снабжения водой во времени могут повлиять: увеличение количества потребителей, их распределение по территории, увеличение требуемых напоров (строительство высотных зданий) и т.д. Влияющих факторов большое количество. Работа системы во времени динамична, не всегда ее безаварийное состояние является гарантией надежного водоснабжения потребителей.

При выборе участков, подлежащих приоритетной перекладке, должен учитываться не только параметр – интенсивность отказов как составляющая увеличения вероятности отключения участков, изменения структуры системы, но и сама структура системы, ее готовность к качественному водоснабжению потребителей при каждом своем состоянии.

Исходным материалом к созданию методики поиска приоритетных направлений по повышению надежности и эффективности функционирования системы являются ранее созданные методики моделирования вероятностных отборов воды из сети (метод сечений), вероятностного распределения потоков, разработка вероятностных показателей надежности обеспечения потребителей, отраженные в статьях [9–11].

Модель вероятностных отборов воды потребителями

В общих чертах можно представить каждый узел отбором воды большой группы потребителей. На рис. 1 изображена плотность распределения вероятности узлового отбора воды по часу.

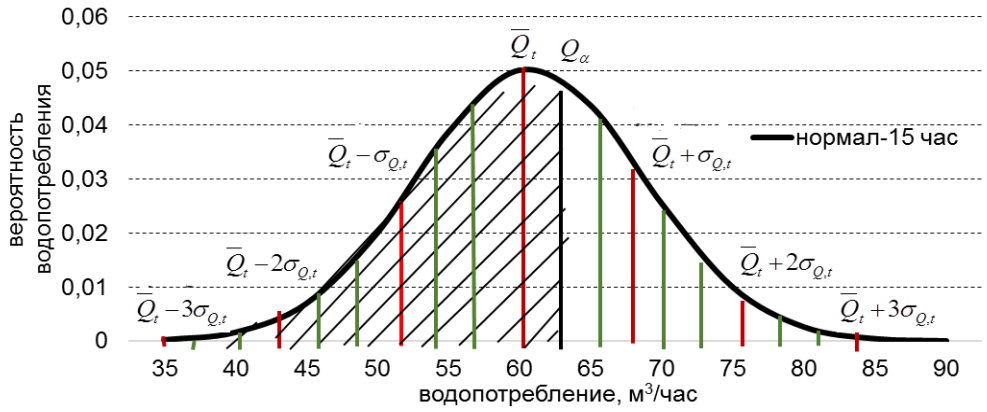

Рис. 1. Плотность распределения вероятности узлового отбора воды часа t
Fig. 1. Probability density distribution of the nodal water withdrawal hour t

[2]Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов. М., 2013.

Распределение вероятности водопотребления рассекается на несколько *k* равных интервалов [α_s-1; α_s], с размером каждого $\sigma_{j,t}/3$, где $\sigma_{j,t}$ – среднеквадратическое отклонение отбора, м^3/час.

Часовые р*аспределения потоков воды по участкам сети* в соответствии системами

$$\begin{cases} AX_{\alpha_s,t} = Q_{\alpha_s,t} \\ A^T P_{\alpha_s,t} = SX^2_{\alpha_s,t} - H_t \end{cases} \qquad \begin{cases} A_{ав} X_{\alpha_s,t} = Q_{\alpha_s,t} \\ A^T_{ав} P_{\alpha_s,t} = SX^2_{\alpha_s,t} - H_t \end{cases}$$

уравнений:

1. Безаварийный режим (без изменения структуры сети).

2. Аварийные режимы (отключение участков СПРВ при ординарном потоке отказов *i* [1,…, n]):

где *t* – время (час); α_s [0,…,18] – сечения; *A-(m-1)·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.

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 [11–13]. Основные ее моменты изложены ниже:

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

где λ – интенсивность отказов участка, 1/(км·год); *l* – длина участка, км; $T_{j,d}$ – продолжительность обеспечения потребителя *j* водой ниже минимально допустимого значения; *d* – множество элементов СПРВ, выход которых в аварию нарушает пониженный уровень водоснабжения *j*-го потребителя:

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

где *T* – продолжительность исследуемого периода, год; $\rho^{обеспечения}_{j,t}$ – вероятность часового обеспечения *j-го* потребителя при

$$\overline{q}_{j,k} \geq \varphi^{ав}_k, k \in F^k_j,$$

где $\overline{q}_{j,k}$ – относительный (к расчетному расходу) часовой расход воды у *j* -го потребителя при отказе *j*-го элемента кольцевой части сети; F^k_j – множество участков кольцевой части водопроводной сети, гидравлически связанных с *j*-м потребителем; $\varphi^{ав}_k$ – норма подачи воды потребителям в аварийных ситуациях.

Моделирование работы систем производится с применением специально созданного математического аппарата – ранее разработанной и представленной программы для ЭВМ[3] «Программа по оценке надежности обеспечения потребителей водой», которая внесена в реестр программ для ЭВМ (Роспатент).

Вывод о надежности СПРВ делается на основе сопоставления сформированных показателей надежности снабжения водой потребителей с нормируемыми значениями: $K_j \geq K_j$ (норм); $P_j \geq P_j$ (норм).

Описание разрабатываемой методики

Формирование показателей K_j, P_j *происходит следующим образом*:

$$K_j = \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^{n} \gamma_i}{\prod_{i=1}^{n} (1 + \gamma_i)} \right) \cdot \left(\frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\left(0,5 \pm \Phi\left(-3 + \alpha_s / 3 \right) \right) \right) \right) \qquad p^{обеспечения}_{j,\alpha_s,t} \text{ при } Q^{нефикс}_{j,\alpha_s,t} = Q^{треб}_{j,\alpha_s,t} \qquad (2)$$

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

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

$$p_{j,\alpha_s,t}^{обеспечения} \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{нефикс} \geq 0,7\cdot Q_{j,\alpha_s,t}^{треб}. \quad (3)$$

В работе [19] для проведения анализа и выявления проблемных участков представлен процесс получения и использования частных показателей надежности $K_j{}^i$ и $P_j{}^i$:

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

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

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

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

Связь частных показателей с обобщенными:

$$K_j = \left(\frac{\left(1+\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\right)\cdot K_j^i}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)}\right) \quad p_{j,\alpha_s,t}^{обеспечения} \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{нефикс} = Q_{j,\alpha_s,t}^{треб}, \quad (4)$$

$$P_j = \exp\left(-\left[\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \cdot l_i \cdot T}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)}\right)\cdot\left(-\ln(P_j^i)\right)\right]\right) = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \cdot l_i \cdot T\cdot\ln(P_j^i)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)}\right) = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\lambda_{0,i}\cdot(0,1\cdot\tau_i^{экпл})^{\alpha_i-1}\right)\cdot l_i\cdot T\cdot\ln(P_j^i)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)}\right), \quad (5)$$

$$p_{j,\alpha_s,t}^{обеспечения} \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{нефикс} \geq 0,7\cdot Q_{j,\alpha_s,t}^{треб}, \text{ и } -\ln(P_j^i) = \left(1-\frac{1}{24}\cdot\sum_{t=1}^{24}\left(0,5\pm\Phi\left(-3+\alpha_s/3\right)\right)\right)$$

Периоду нормальной эксплуатации будут соответствовать минимальные значения[2] $\lambda = \lambda_0$ [3]:

$$P_j^0 = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_{0,i}\cdot l_i\cdot T\cdot\ln(P_j^i)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)}\right),$$

где λ_0 – интенсивность отказов, соответствующая периоду нормальной эксплуатации. Каждый потребитель, подключенный к системе, должен быть обеспечен требуемым количеством и качеством воды. Проверку стоит начинать с определения расчетных показателей K_j, P_j каждого потребителя, сопоставления их с нормируемыми значениями K_j (норм), P_j (норм). Если расчетные показатели каждого потребителя выше нормируемых, можно не производить никаких действий.

Система работает качественно. Если расчетные показатели надежности узлов-потребителей P_j ниже нормируемых значений $P_j < P_j$ (норм), то возникает необходимость в выявлении причин, снижающих качество снабжения водой указанных потребителей, и в разработке мероприятий по их устранению.

В данном случае предлагается начать с определения K_j, P_j при минимальных значениях $\lambda = \lambda_0$, соответствующих периоду нормальной эксплуатации.

Для наглядности проведены следующие манипуляции – преобразовано уравнение (5) в представленном виде:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_{0,i}\cdot l_i\cdot T\cdot\ln(P_j^i)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)} = \ln(P_j^0) \rightarrow \sum_{i=1}^{n}\lambda_{0,i}\cdot l_i\cdot T\cdot\ln(P_j^i) = \lambda_{0,1}\cdot l_1\cdot T\cdot\ln(P_j^1)+\ldots+\lambda_{0,n}\cdot l_n\cdot T\cdot\ln(P_j^n) = \ln(P_j^0)\cdot\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)\right). \quad (6)$$

На примере схемы (рис. 2) представлены следующие шаги.

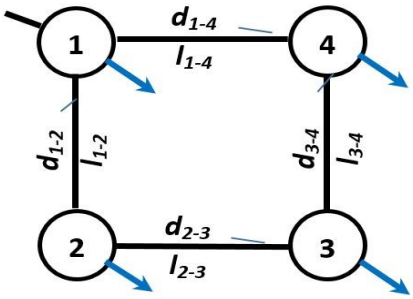

Рис. 2. Схема систем подачи и распределения воды кольцевой структуры
Fig. 2. Diagram of water supply and distribution systems of the ring structure

При использовании методики частных показателей надежности, уравнение (6) для указанной схемы выражено системой

$$\begin{cases} \lambda_{0,1-2}\cdot l_{1-2}\cdot T\cdot\ln(P_1^{1-2})+\lambda_{0,2-3}\cdot l_{2-3}\cdot T\cdot\ln(P_1^{2-3})+\lambda_{0,3-4}\cdot l_{3-4}\cdot T\cdot\ln(P_1^{3-4})+\lambda_{0,1-4}\cdot l_{1-4}\cdot T\cdot\ln(P_1^{1-4})=\ln(P_1^0)\cdot\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)\right) \\ \lambda_{0,1-2}\cdot l_{1-2}\cdot T\cdot\ln(P_2^{1-2})+\lambda_{0,2-3}\cdot l_{2-3}\cdot T\cdot\ln(P_2^{2-3})+\lambda_{0,3-4}\cdot l_{3-4}\cdot T\cdot\ln(P_2^{3-4})+\lambda_{0,1-4}\cdot l_{1-4}\cdot T\cdot\ln(P_2^{1-4})=\ln(P_2^0)\cdot\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)\right) \\ \lambda_{0,1-2}\cdot l_{1-2}\cdot T\cdot\ln(P_3^{1-2})+\lambda_{0,2-3}\cdot l_{2-3}\cdot T\cdot\ln(P_3^{2-3})+\lambda_{0,3-4}\cdot l_{3-4}\cdot T\cdot\ln(P_3^{3-4})+\lambda_{0,1-4}\cdot l_{1-4}\cdot T\cdot\ln(P_3^{1-4})=\ln(P_3^0)\cdot\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)\right) \\ \lambda_{0,1-2}\cdot l_{1-2}\cdot T\cdot\ln(P_3^{1-2})+\lambda_{0,2-3}\cdot l_{2-3}\cdot T\cdot\ln(P_4^{2-3})+\lambda_{0,3-4}\cdot l_{3-4}\cdot T\cdot\ln(P_4^{3-4})+\lambda_{0,1-4}\cdot l_{1-4}\cdot T\cdot\ln(P_4^{1-4})=\ln(P_4^0)\cdot\left(\prod_{i=1}^{n}(1+\gamma_i)\right) \end{cases}.$$

Для наглядности Система представлена выражением

$$\lambda_{1-2}\cdot l_{1-2}\cdot T\begin{bmatrix}\ln(P_1^{1-2})\\ \ln(P_2^{1-2})\\ \ln(P_3^{1-2})\\ \ln(P_4^{1-2})\end{bmatrix};\lambda_{2-3}\cdot l_{2-3}\cdot T\begin{bmatrix}\ln(P_1^{2-3})\\ \ln(P_2^{2-3})\\ \ln(P_3^{2-3})\\ \ln(P_4^{2-3})\end{bmatrix};\lambda_{3-4}\cdot l_{3-4}\cdot T\begin{bmatrix}\ln(P_1^{3-4})\\ \ln(P_2^{3-4})\\ \ln(P_3^{3-4})\\ \ln(P_4^{3-4})\end{bmatrix};\lambda_{1-4}\cdot l_{1-4}\cdot T\begin{bmatrix}\ln(P_1^{1-4})\\ \ln(P_2^{1-4})\\ \ln(P_3^{1-4})\\ \ln(P_4^{1-4})\end{bmatrix}.$$

Формируется табл. 1 частных показателей.

Таблица 1. Определение частных показателей $P_j{}^i$ при каждом *i-м* состоянии систем подачи и распределения воды
Table 1. Determination of partial indicators $P_j{}^i$ for each *i*–th state of water supply and distribution systems

Узел *j* / участок *i*	$P_j{}^{норм}$	Участок			
		1–2	2–3	3–4	1–4
		λ^{01-2}	$\lambda^{0}{}_{2-3}$	$\lambda^{0}{}_{3-4}$	$\lambda^{0}{}_{1-4}$
1	$P_1{}^{норм}$	$P_1{}^{1-2}$	$P_1{}^{2-3}$	$P_1{}^{3-4}$	$P_1{}^{1-4}$
2	$P_2{}^{норм}$	$P_2{}^{1-2}$	$P_2{}^{2-3}$	$P_2{}^{3-4}$	$P_2{}^{1-4}$
3	$P_3{}^{норм}$	$P_3{}^{1-2}$	$P_3{}^{2-3}$	$P_3{}^{3-4}$	$P_3{}^{1-4}$
4	$P_4{}^{норм}$	$P_4{}^{1-2}$	$P_4{}^{2-3}$	$P_4{}^{3-4}$	$P_4{}^{1-4}$

По результатам сравнения частных показателей $P_j{}^i$ при разных структурных состояниях СПРВ с нормируемыми значениями делаются соответствующие выводы.

Возможные варианты мероприятий по повышению надежности снабжения водой потребителей:

1. Если у потребителя даже в таких условиях $P_j{}^0 < P_j$ (норм), перекладка стареющих участков на новые с таким же диаметром не обеспечит в полной мере качественное снабжение потребителя. Требуется проведение мероприятий по увеличению пропускной способности основных, резервных линий (параллельная прокладка участка, замена участка с увеличением диаметра), повышение напора до $P_j^0 \geq P_j(норм)$.

2. Если же сопоставление расчетных показателей K_j, P_j, определенных при минимальных значениях $\lambda = \lambda_0$, с нормируемыми значениями показало $P_j^0 \geq P_j(норм)$, а при фактических значениях λ $P_j < P_j(норм)$, следует расставить приоритеты по замене изношенных участков с такими же диаметрами.

При существенном превышении расчетных показателей K_j над нормируемым $K_j > K_j$ (норм) и пониженными показателями P_j – $P_j < P_j(норм)$ наиболее привлекательным вариантом может быть устройство дополнительных перемычек. При большой протяженности участков, малом количестве перемычек, повышение напора может не дать желаемого результата, но приведет к большому объему энергетических затрат (затрат на электроэнергию).

3. Если расчетные показатели K_j ниже нормируемых $K_j < K_j$ (норм), $P_j^0 \geq P_j(норм)$, $P_j < P_j(норм)$ повышение напора в СПРВ может быть действенной мерой. Возможных вариантов решения поставленной задачи по обеспечению заданного уровня надежности снабжения потребителей существует большое количество: от отдельных мероприятий до их совместных комбинаций.

Каждое решение может придать системе как изменение в качестве ее работы, так и ее стоимостной составляющей – капитальные и эксплуатационные затраты. Так или иначе, по итогам моделирования возможных мероприятий и их комбинаций должно производиться технико-экономическое сравнение [3, 13]:

$$З(R) = (E + f_c) \cdot K + C^э \cdot Э \text{, при } R_j \geq R_j(\text{норм}), R_j(\text{норм}) = (K_j(\text{норм}), P_j(\text{норм})),$$

где K – капиталовложения, тыс. руб.; f_c – доля на амортизацию СПРВ; E – коэффициент эффективности капиталовложений; $C^э \cdot Э$ – эксплуатационные издержки, тыс. руб. По результатам сравнения принимается вариант с обеспечением заданного уровня надежности снабжения потребителей при наименьших приведенных затратах $З(R)$ (тыс. руб.):

$$min(З(R) + E(R)) \text{, при } R_j \geq R_j(\text{норм}), R_j(\text{норм}) = (K_j(\text{норм}), P_j(\text{норм})).$$

Определив при $\lambda = \lambda_0$ каждого участка наиболее оптимальный вариант работы СПРВ, утверждается комплекс приоритетных мероприятий: перекладка участков с таким же диаметром, укладка труб с повышенным диаметром, параллельная прокладка, создание дополнительных перемычек, повышение напора, совместная комбинация указанных мероприятий. Приведен пример. Рассмотрена СПРВ кольцевой структуры, состоящей из 6 узлов и 7 участков, рис. 3. Отборы воды каждым узлом представлены на рис. 4.

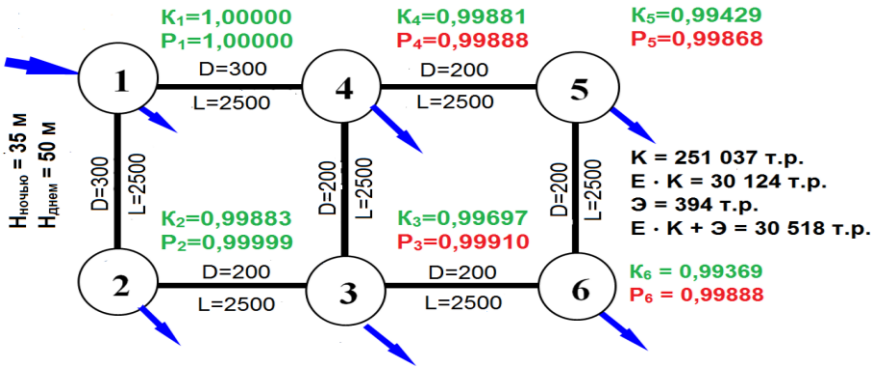

Рис. 3. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (до проведения мероприятий) – исходный
Fig. 3. Ring diagram of water supply and distribution systems (before the events) – source

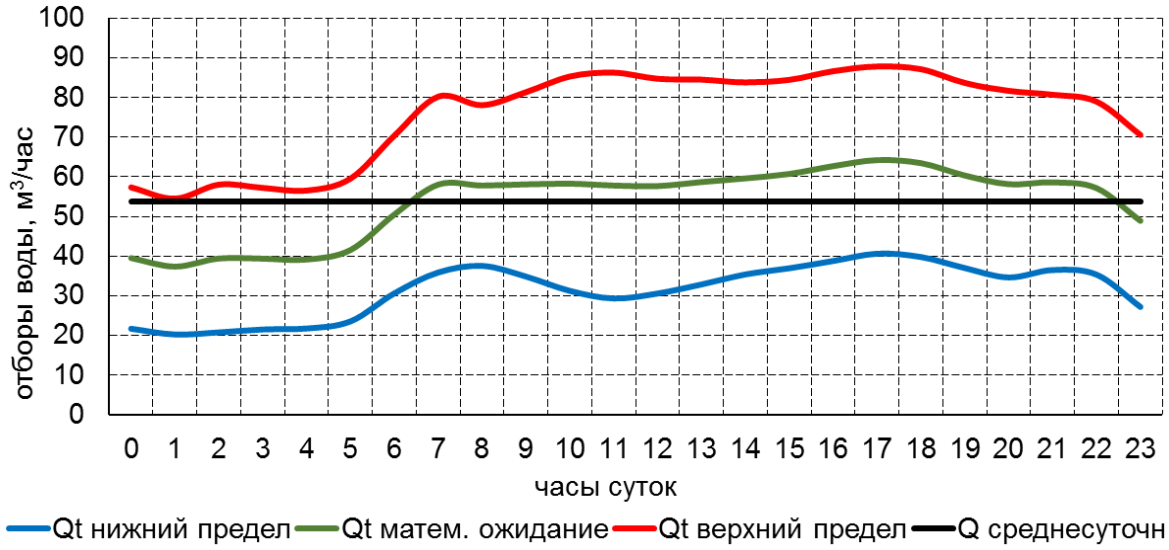

Рис. 4. Диапазоны суточного изменения отборов воды одним узлом
Fig. 4. Ranges of daily changes in water withdrawals by one node

Суточное распределение напора воды, подаваемой в сеть представлено на рис. 5.

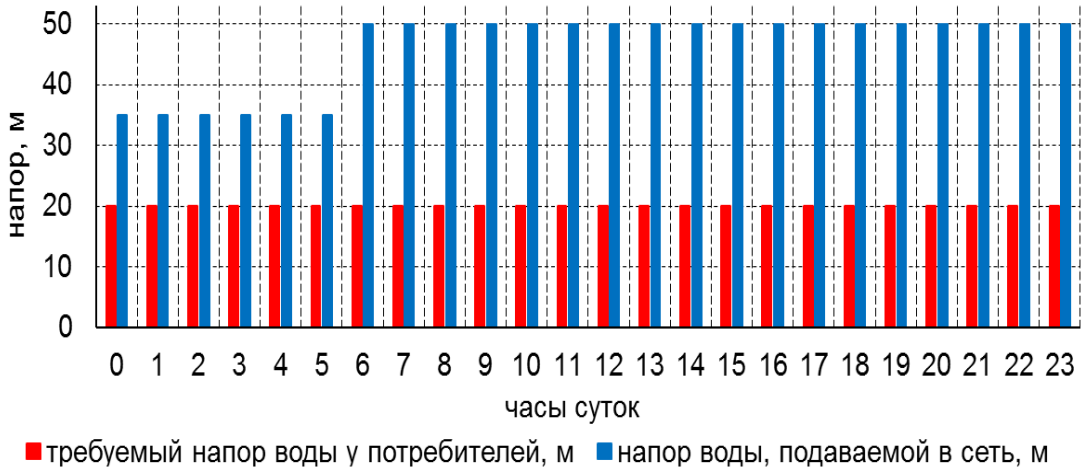

Рис. 5. Суточное распределение напора воды, подаваемой в систему подачи и распределения воды
Fig. 5. Daily distribution of water pressure supplied to the water supply and distribution system

Для определения вероятности нахождения СПРВ в безаварийном и аварийных состояниях при ординарном потоке отказов принят ряд допущений: материал трубопровода – сталь, период эксплуатации – нормальной, согласно [17–19] интенсивность отказов трубопровода, соответствующая периоду нормальной эксплуатации, 1/(км·год)), $\lambda^0_i = 0{,}064 \cdot D_i^{-0,8}$, где D_i – диаметр участка ***i***, м; время восстановления участка ***i*** - $T_{вс}$=24 часа; $\mu_{вс}$ = 8760 / 24 = 365 (1/год). Проведено моделирование аварийных отключений участков СПРВ, формирование обобщенных показателей надежности снабжения потребителей $\boldsymbol{K_j}$ и $\boldsymbol{P_j}$.

Результаты указаны графически на рис. 3 (зеленым цветом выделены расчетные показатели надежности, соответствующие нормируемым значениям $K_j \geq K_j$ *(норм)*, K_j *(норм)=0,99178*, $P_j \geq P_j$ *(норм)*, P_j *(норм) = 0,99998,* красным цветом – расчетные показатели ниже нормируемых значений $P_j < P_j$ *(норм)*.

Сформированные показатели при сопоставлении с нормируемыми значениями указывают на проблемы водоснабжения узлов 3–6. Оценка влияния каждого ***i*** – го участка на качество функционирования системы. Результаты определения частных показателей, рассчитываемых по предлагаемой методике представлено в табл. 2.

Таблица 2. Определение частных показателей P_j^i при каждом ***i***–ом состоянии систем подачи и распределения воды
Table 2. Determination of partial indicators P_j^i for each ***i*** –th state of water supply and distribution systems

Участок ***i*** / узел ***j***		Отключение участков ***i***							
		1-2	***2-3***	***1-4***	***4-3***	***4-5***	***3-6***	***5-6***	***Режим без аварий***
ф, мм		***300***	***200***	***300***	***200***	***200***	***200***	***200***	
L_i, *м*	$P_j^{норм}$	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	
λ^0_i, 1/(км·год)		0,16768	0,23193	0,16768	0,23193	0,23193	0,23193	0,23193	
λ_i, 1/(км·год)		0,16768	0,23193	0,16768	0,23193	0,23193	0,23193	0,23193	
$\lambda_i \cdot L_i$, 1/год		0,41920	0,57982	0,41920	0,57982	0,57982	0,57982	0,57982	
1	**0,99998**	1	1	1	1	1	1	1	1
2	**0,99998**	***0,98940***	1	1	1	1	1	1	1
3	**0,99998**	1	1	***0,45246***	1	1	1	1	1
4	**0,99998**	1	1	***0,37309***	1	1	1	1	1
5	**0,99998**	1	1	***0,37096***	1	***0,88415***	1	1	1
6	**0,99998**	1	1	***0,37309***	1	1	1	1	1

Частные показатели надежности P_j^i уточняют особо низкое качество снабжения удаленных узлов-потребителей при отключении участка 1–4. Обстоятельство объясняется отсутствием достаточной пропускной способности резервной линии 2–3. Участок не может пропустить в минимально допустимых (аварийных) пределах объемы воды для обеспечения указанных потребителей.

Составлен комплекс возможных мероприятий, обозначим их *м-1*, *м-2*, *м-3*, *м-4*, *м-5*.

На рис. 6 представлена схема СПРВ с увеличением диаметра участка 2-3 с 200 мм до 300 мм (*м-1)*.

Согласно схеме (рис. 6) можно наблюдать, что качество снабжения водой узлов-потребителей 3, 4 существенно улучшилось, их показатели надежности находятся в пределах нормируемых значений. Качество снабжения узлов 5, 6 также улучшилось, но вероятность возникновения отказа еще достаточно высока. При снижении диаметра участка 5–6 с 200 мм до 150 мм общая стоимость капиталовложений в сеть изменится незначительно.

На рис. 7 представлена дополнительно замена участка 3–4 с 200 мм до 250 мм (*м-2)*.

Незначительно улучшается качество удаленных узлов-потребителей 5, 6 с увеличением при этом объема капиталовложений в систему.

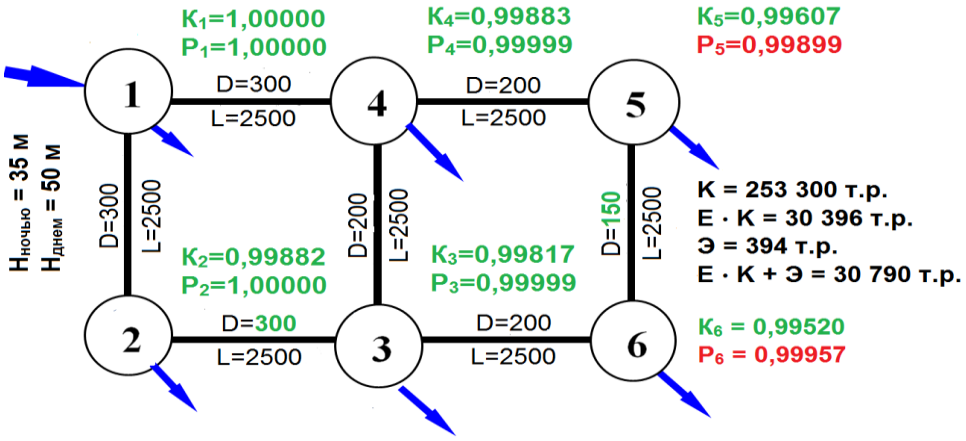

Рис. 6. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (с заменой диаметра участка 2–3 с 200 мм до 300 мм) – м-1
Fig. 6. Ring diagram of water supply and distribution systems (with the replacement of the diameter of the section 2-3 from 200 mm to 300 mm) – m-1

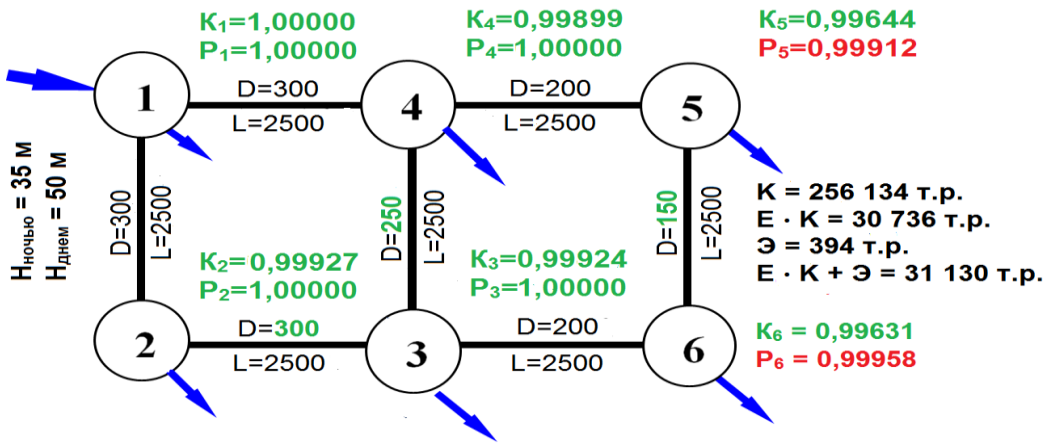

Рис. 7. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (с заменой диаметра участка 2-3 с 200 мм до 300 мм, с заменой диаметра участка 3-4 с 200 мм до 250 мм) – м-2
Fig. 7. Ring diagram of water supply and distribution systems (with the replacement of the diameter of the section 2-3 from 200 mm to 300 mm, with the replacement of the diameter of the section 3-4 from 200 mm to 250 mm) – m-2

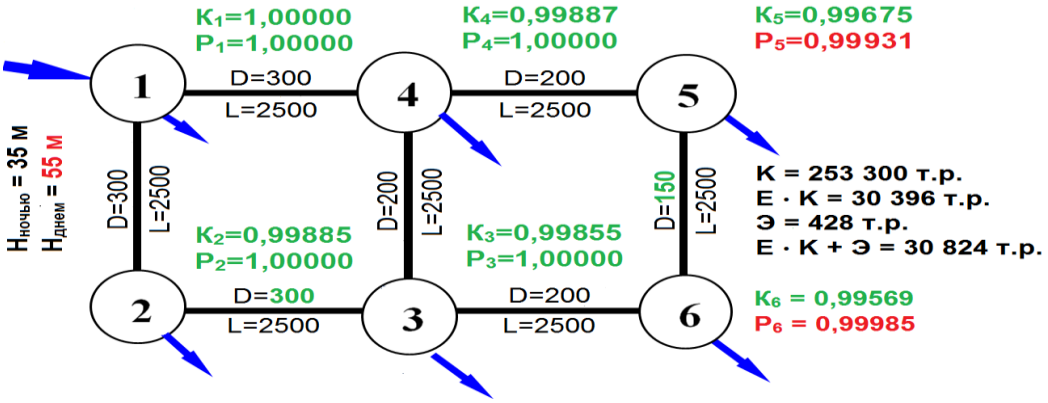

Рис. 8. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (с заменой диаметра участка 2-3 с 200 мм до 300 мм, увеличением напора в дневное время с 50 до 55 м) – м-3
Fig. 8. Ring diagram of water supply and distribution systems (with the replacement of the diameter of the section 2-3 from 200 mm to 300 mm, increasing the pressure in the daytime from 50 to 55 m) – m-3

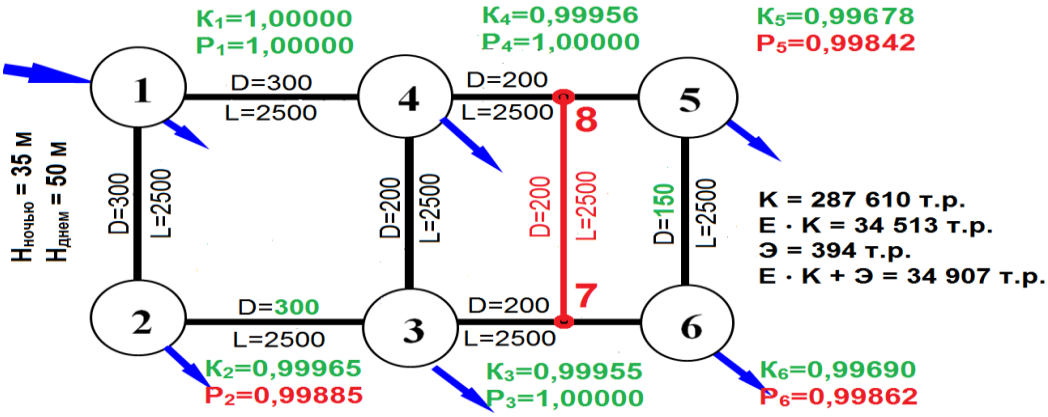

Рис. 9. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (с созданием дополнительной перемычки - поперек) – м-4
Fig. 9. Ring diagram of water supply and distribution systems (with the creation of an additional bridge - across) – m-4

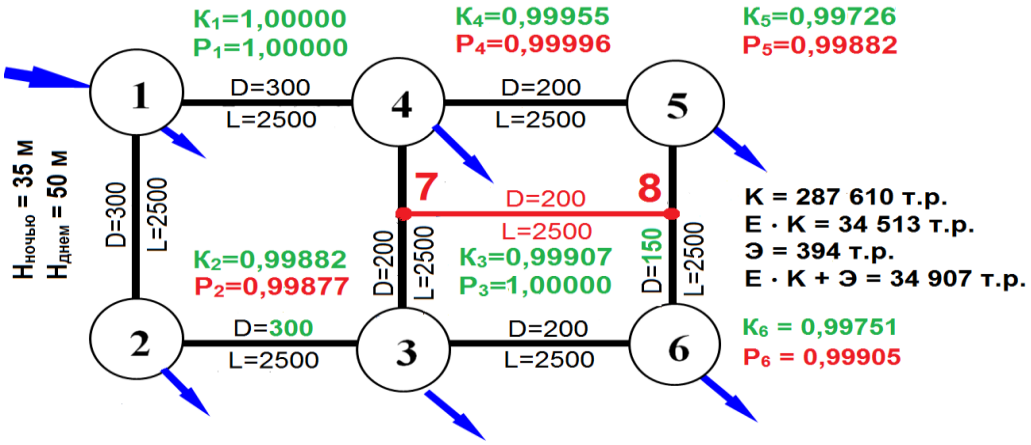

Рис. 10. Кольцевая схема систем подачи и распределения воды (с созданием дополнительной перемычки - вдоль) – м-5
Fig. 10. Ring diagram of water supply and distribution systems (with the creation of an additional bridge - along) – m-5

Увеличение эксплуатационных расходов путем повышения напора в дневное время с 50 до 55 м (*м-3)*, указанное на рис. 8, улучшит качество снабжения удаленных потребителей.

Рассмотрены варианты создания дополнительных перемычек (*м-4, м-5)*. Схемы СПРВ указаны на рис. 9 и 10.

Устройство перемычек вдоль или поперек в данном случае (*м-4, м-5)* не улучшают качество снабжения потребителей, существенно увеличивая при этом объем капиталовложений в сеть. На рис. 11 показано сравнение расчетных показателей – вероятностей безотказного снабжения потребителей P_j при возможных вариантах мероприятий (*исходный вариант*, *м-1, м-2, м-3, м-4, м-5*).

Наиболее приемлемым из представленных вариантов по качеству снабжения потребителей является схема СПРВ с заменой диаметра участка 2–3 с 200 мм до 300 мм, с увеличением при этом напора в дневное время с 50 до 55 м – (*м-3)*. Распределение приведенных затрат по рассматриваемым вариантам представлено на рис. 12.

Уровень надежности функционирования СПРВ мероприятия (м-3), согласно рис. 12, соответствует не самым высоким затратам. Именно комплексное мероприятие: повышение пропускной способности участка 2–3 с увеличением в дневное время напора – в данном случае будет оптимальным вариантом, приоритетным направлением.

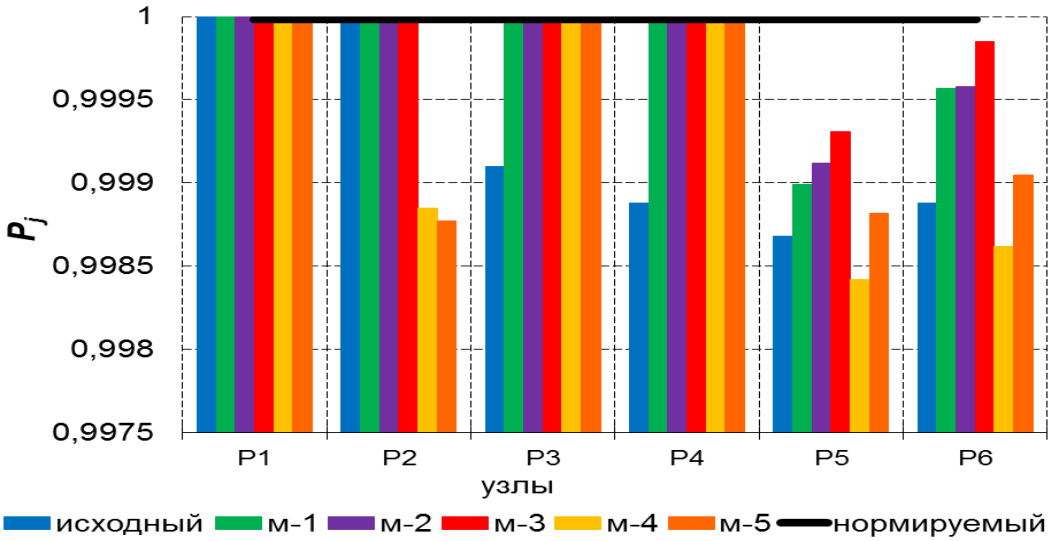

Рис. 11. Распределение обобщенных P_j по узлам до и после проведения мероприятий
Fig. 11. Distribution of generalized P_j by nodes before and after the events

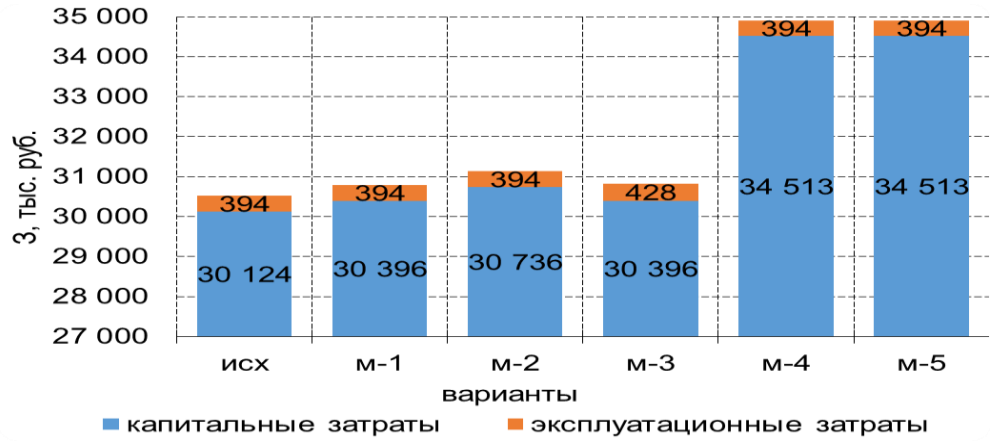

Рис. 12. Распределение приведенных затрат по рассматриваемым вариантам
Fig. 12. Distribution of the reduced costs according to the options under consideration

ВЫВОДЫ

1. Если при моделировании работы системы расчетные показатели надежности водоснабжения потребителей показали результат ниже нормируемых значений, стоит рассчитать эти показатели на период нормальной эксплуатации каждого участка ($\lambda_i = \lambda^0_i$). Если расчетные показатели останутся также ниже нормируемых, системе требуется кардинальное внесение изменений по увеличению пропускной способности, повышению напора.

2. Приоритетные направления по обеспечению заданного уровня надежности снабжения потребителей должны рассматриваться комплексно: с учетом изношенности сетей (λ_i – интенсивностей отказов участка i, ед./(кол-во км в год)) и оптимального варианта работы системы в период нормальной эксплуатации каждого участка ($\lambda_i = \lambda^0_i$). Необходимо учитывать риски нанесения ущерба от подтопления в случае аварии, их возможные последствия, риски возмещения ущерба от некачественного оказания услуг.

3. Очевидно, приоритетным направлением в основной массе будет являться вариант, где требуется перекладка изношенного участка с увеличением пропускной способности (увеличением диаметра).

4. Каждая сеть по-своему уникальна, поэтому не может быть универсальных решений. Можно придерживаться рекомендаций методик, но они не всегда дают оптимальный результат.

Целесообразно рассматривать разные варианты решений, а окончательное принимать на основе технико-экономического сравнения.

Придерживаясь указанных выводов, легче разработать адекватные эффективные мероприятия по устранению проблем некачественного функционирования СПРВ.

Разработанная методика с применением вышеуказанного математического аппарата – программы для ЭВМ – позволит повысить гибкость эксплуатируемых СПРВ, обеспечить и поддерживать на должном уровне ее надежную и эффективную работу.

Использование методики определения частных показателей надежности может найти применение в оперативно-диспетчерских службах коммунальных предприятий.

Именно моделирование работы системы под каждое ее структурное состояние позволит этим службам эффективнее выполнять свою работу: планово-предупредительные ремонты на сетях и других обслуживаемых объектах, при проведении аварийно-восстановительных работ предупреждать потребителей о возможных перебоях в подаче воды, исходя из оперативной обстановки, принимать взвешенные решения.

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.
3. Игнатчик С. Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сети

водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 12. С. 57–67.
4. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения. М.: Стройиздат, 1979. 232 с.
5. Венцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
6. Карамбиров С. Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. М.: Московский государственный университет печати, 2004. 197 с.
7. Карамбиров С. Н., Буркова Ю. Г. Анализ и синтез сложных инженерных систем с применением современных математических методов: монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 193 с.
8. Карамбиров 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. Чупин Р. В., Душин А. С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 12. С. 35–44.
10. 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. 576–593. https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-576-593.
11. 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.
12. Найманов А. Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 12. С. 11–16.
13. 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.
14. 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.
15. Ильин Ю. А. Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987. 320 с.
16. Митянин В. М. Исследование причин повреждений трубопроводов в городских системах водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1979. № 2. С. 2–8.
17. Гальперин Е. М. Надежностные расчеты кольцевых водопроводных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 8. С. 26–29.
18. Гальперин Е. М. Определение надежности функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 1989. № 6. С. 11–13.
19. 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.

REFERENCES

1. Dushin A. S., Chupin R. V., Maizel I. V. 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;2:76-83. (In Russ.).
2. Chupin V. R., Dushin A. S., Chupin R. V. Modeling water consumption and emergencies in water supply and distribution systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2012;10:130-136. (In Russ.).
3. Ignatchik S. Yu. Estimation of reliability, safety and investment efficiency of a wastewater disposal system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika = Water supply and sanitary*. 2011;12:57-67. (In Russ.).
4. Abramov N. N. Reliability of water supply systems. Moscow: Stroiizdat; 1979. 232 p. (In Russ.).
5. Vencel' E. S. Probability theory. Moscow: Vysshaja shkola; 2001. 575 p. (In Russ.).
6. Karambirov S. N. Mathematical modeling of water supply and distribution systems under conditions of multi-mode and uncertainty. Moscow: Moscow State University of Printing; 2004. 197 p. (In Russ.).
7. Karambirov S. N., Burkova Ju. G. Analysis and synthesis of complex engineering systems using modern mathematical methods. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 2015. 193 p.
8. Karambirov S. N., Mordyasov M. A., Burkova Yu. G. 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. Chupin R. V., Dushin A. S. Assessment of the customer water supply reliability. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2017;12:35-44. (In Russ.).
10. Chupin V. R., Dushin A. S. Assessment of the reliability of water supply to consumers: water sup-

ply reliability indicators. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. 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.
11. Chupin V. R., Dushin A. S. Parameter optimisation for new and reconstructed systems of water supply and distribution for ensuring consumer's uninterrupted water supply. *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.
12. Naymanov A. Ya. Features of reliability evaluation of ring water supply system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique*. 2006;12:11-16. (In Russ.).
13. 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.).
14. Chupin V. R., Dushin A. S. Assessment and improvement of the operational reliability of the water supply and distribution system in the Irkutsk-II microdistrictof 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
15. Ilyin Yu. A. Calculation of water supply reliability. Moscow: Stroyizdat; 1987. 320 p. (In Russ.).
16. Mityanin V. M. Investigation of the causes of pipeline damage in urban water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique.* 1979;2:2-8. (In Russ.).
17. Galperin E. M. Reliability calculations for ring water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique.* 2003;8:26-29. (In Russ.).
18. Galperin E. M. Determination of the reliability of the functioning of the ring water supply network. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary technique.* 1989;6:11-13. (In Russ.).
19. 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.

Информация об авторе

А. С. Душин,
инженер-строитель,
ООО «Сетевая компания «ИРКУТ»,
664020, г. Иркутск, ул. Авиастроителей, 28А, Россия,
e-mail: a.s.dushin@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0001-7307-5167

Вклад автора

Душин А. С. провел исследование, подготовил рукопись к печати и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.09.2022.
Одобрена после рецензирования 29.09.2022.
Принята к публикации 03.10.2022.

Information about the author

Aleksei S. Dushin,
Civil engineer,
LLC "Network company "IRKUT",
28A Aviastroiteley St., Irkutsk 664020,
Russia,
e-mail: a.s.dushin@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0001-7307-5167

Contribution of the author

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

Conflict of interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 02.09.2022.
Approved after reviewing 29.09.2022.
Accepted for publication 03.10.2022.