



## Оценка и повышение эксплуатационной надежности системы подачи и распределения воды в микрорайоне Иркутск-II г. Иркутска

© В.Р. Чупин<sup>1</sup>, А.С. Душин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>ООО «Сетевая компания «ИРКУТ», г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – на примере функционирования системы водоснабжения микрорайона Иркутск-II и смены ее режимов апробировать разработанную методику по оценке и повышению эксплуатационной надежности системы подачи и распределения воды и программу для ЭВМ по оценке надежности обеспечения потребителей водой. В работе отражены положения методики: составление вероятностных отборов воды потребителями и математической модели вероятностного потокораспределения, формирование узловых показателей надежности обеспечения потребителей, а также описание выполнения методики. По результатам обработки статистических данных по отборам воды и авариям на участках водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II за предыдущие годы с использованием электронных моделей разработанной программы для ЭВМ проведено моделирование функционирования системы подачи и распределения воды микрорайона в различных режимах эксплуатации. Проведена оценка надежности обеспечения потребителей водой, сформированы узловые показатели качества обеспечения потребителей расчетного и пониженного уровня для каждого потребителя (узла) расчетной схемы, выявлены участки сети, наиболее негативно влияющие на качество обеспечения потребителей, предложены мероприятия по оптимизации работы системы, оценено их влияние. Преимуществом вероятностного моделирования, отвечающего адекватностью реальным процессам функционирования системы, является возможность разработки более точных правил управления системой подачи и распределения воды. В работе показана эффективность разработанной методики и программы для ЭВМ, которые, в свою очередь, позволяют оценивать работоспособность, надежность, режимную управляемость системы. Разработанная методика расчета и программа для ЭВМ – современный и эффективный инструмент для решения многих эксплуатационных и проектных задач содержания и развития систем водоснабжения.

**Ключевые слова:** система подачи и распределения воды, нефиксированный отбор воды, вероятностный характер отбора воды и возникновения аварийных ситуаций, вероятность безотказного снабжения потребителей водой, коэффициент готовности обеспечения потребителей водой, оптимизация работы системы подачи и распределения воды

**Для цитирования:** Чупин В.Р., Душин А.С. Оценка и повышение эксплуатационной надежности системы подачи и распределения воды в микрорайоне Иркутск-II г. Иркутска. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 1. С. 112–125. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-112-125>

## Assessment and improvement of the operational reliability of the water supply and distribution system in the Irkutsk-II microdistrict of the Irkutsk city

Victor R. Chupin, Aleksei S. Dushin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,

ООО "Network company «ИРКУТ», Irkutsk, Russia

**Abstract:** The aim was to test the developed methodology for assessing and improving the operational reliability of the water supply and distribution system and computer software for assessing the reliability of water supply to end users using an example of the water supply system in the Irkutsk-II microdistrict. The research methodology consists in compilation of probabilistic water withdrawal by end users, compilation of a mathematical model of probabilistic flow distribution, formation of key indicators of reliability of end users provision, description of the implementation of the methodology. Based on the results of

processing statistical data on water withdrawals and accidents at the sections of water supply networks of the Irkutsk-II microdistrict for previous years, using electronic models of the developed computer software, the functioning of the water supply and distribution system of the microdistrict was simulated in various operating modes. The assessment of the reliability of supplying end users with water was carried out, key indicators of the quality of providing them with a calculated and reduced level for each end user (node) of the calculation scheme were formed, sections of the network that most negatively affect the quality of feeding end users were identified, measures were proposed to optimize the operation of the system, and their impact was evaluated. The advantage of probabilistic modeling, which corresponds to the adequacy of the real processes of the system's functioning, is the possibility of developing more precise rules for controlling the water supply and distribution system. The paper shows the effectiveness of the developed methodology and software, which, in turn, allow evaluating the performance, reliability, and controllability of the system. The developed calculation method and software is a modern and effective tool for solving many operational and design tasks for the maintenance and development of water supply systems.

**Keyword:** water supply and distribution system, non-fixed water withdrawal, probabilistic nature of water withdrawal and occurrence of emergencies, probability of trouble-free water supply to consumers, coefficient of availability of water supply to consumers, optimization of water supply and distribution system

**For citation:** 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>

## Введение

Функционирование системы водоснабжения осуществляется в условиях постоянного изменения множества факторов целенаправленного и случайного характера, влияющих на режимы ее работы. Создание наиболее эффективной и при этом надежной системы может быть осуществлено только на основе использования инновационных технологий, знания технического состояния системы, анализа характера взаимодействия между ее основными элементами, достоверных прогнозов суточных и часовых отборов воды потребителями, их динамики изменения во времени.

## Методы

На основе моделирования совместных процессов потребления воды, возникновения и ликвидации аварийных ситуаций<sup>1</sup> [1–18] на кафедре городского строительства и хозяйства Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) разработана методика оценки эксплуатационной надежности системы подачи и распределения воды (СПРВ), позволяющая исследовать режимы ее функцио-

нирования, оценивать их работоспособность и режимную управляемость, а также качество обеспечения потребителей водой.

### Основные положения методика

#### Составление модели вероятностных отборов воды потребителями

Каждый узел представлен большой группой потребителей, имеющих непрерывное распределение отборов воды. Вероятностная характеристика потребителя воды представлена на рис. 1.

Отбор воды каждого потребителя (узла) по часу  $t$  рассматривается согласно нормальному закону распределения в пределах трехкратного среднеквадратичного отклонения (3-сигма) от математического ожидания:

$\bar{Q}_t^{[\min]} - 3 \cdot \sigma_{\bar{Q},t}^{[\min]}$  – нижний предел;

$\bar{Q}_t^{[\max]} + 3 \cdot \sigma_{\bar{Q},t}^{[\max]}$  – верхний предел.

Функция распределения вероятности водопотребления по часу  $t$  разбивается на ряд интервалов, при этом шаг интервала будет равен  $\sigma_{j,t}/3$ , число интервалов  $k - 18$ , а сечений  $\alpha_s - 19$ .

<sup>1</sup>Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987. 320 с.;

Ступина Л.А., Чупин В.Р. Проблема нормирования надежности водоснабжения потребителей в задачах проектирования систем транспорта воды // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Киев: УМК ВО, 1989. С. 171–174;

Шопенский Л.А. Аналитическое описание режимов водопотребления и построения расчетных графиков: сб. науч. тр. Вып. I. М.: ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1975.

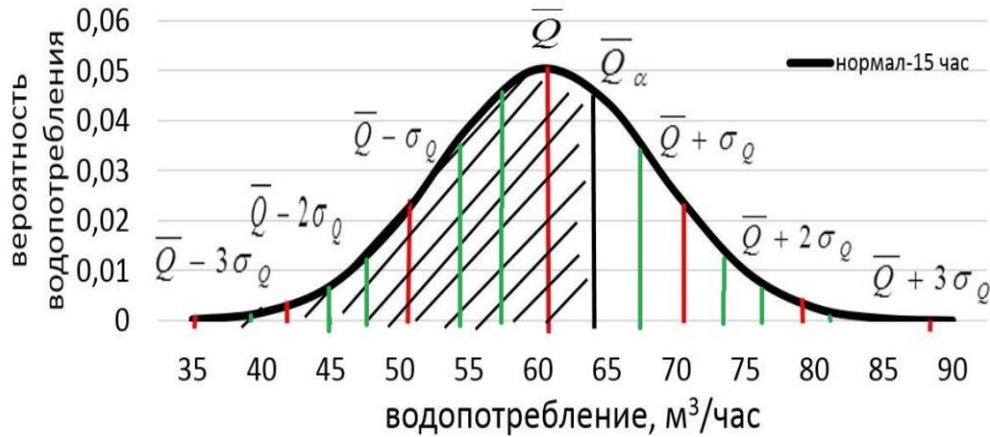


Рис. 1. Плотность распределения вероятности потребления воды по часу (t)  
 Fig. 1. Density of distribution probability of water consumption by hour (t)

На рис. 1 сечения выделены красным и зеленым цветом. Отбор воды в каждом сечении  $\alpha_s$  составит

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

Для математического описания плотности распределения вероятности потребления воды использован нормальный закон распределения.

*Составление математической модели вероятностного потокораспределения*

Потокораспределение по участкам сети производится по каждому часу  $t$  по сечениям  $\alpha_s [0, \dots, 18]$  согласно 2-м системам уравнений (законы Кирхгофа), из которых 1 система (без изменения структуры сети) – безаварийный режим, 2 система (с изменением структуры сети – ординарный поток отказов  $i [1, \dots, n]$ ) – аварийный режим:

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

где  $A - (m-1) \cdot n$  – матрица соединений узлов и ветвей расчетной схемы сети с элементами  $a_{ij}$ ;  $A_{ав}$  – усеченные матрицы, получаемые из  $A$  путем поочередного исключения элементов  $n_i$ , т.е.  $A_{ав} - (m-1) \times (n-1)$ ;  $X - n$  – вектор расходов на ветвях расчетной схемы с элементами  $x_i$ ;  $X_{ав} - (n-1)$  – вектор расходов на ветвях расчетной схемы с элементами  $x_i$ ;  $H - n$  – вектор действующих напоров на ветвях;  $P - (m-1)$  – мерный вектор узловых давлений с элементами  $P_j$ ;  $t$  – вре-

мя (час);  $Q - (m-1)$  – мерный вектор узловых отборов с элементами  $Q_j = f(t, \alpha_s, P_j)$ :

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

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

Оценку надежности системы предлагается производить узловыми показателями качества обеспечения потребителей расчетного и пониженного уровня, определяемых для каждого потребителя (узла) расчетной схемы  $j$ :  $K_j$  – коэффициент готовности к обеспечению расчетного водоснабжения  $j$ -го потребителя,  $P_j$  – вероятность безотказного водоснабжения  $j$ -го потребителя.

Нормирование значений вероятности безотказного водоснабжения  $j$ -го потребителя и коэффициента готовности к обеспечению расчетного водоснабжения  $j$ -го потребителя согласно СНиП 2.04.02-84<sup>2</sup>: 1 категория –  $t_{сниж} = 3$  сут. со снижением до 30%  $t_{пер} = 10$  мин:

$$K_j(\text{норм}) = \frac{8760 - t_{сниж}}{8760} = 0,99178.$$

$$P_j(\text{норм}) = \frac{8760 - t_{пер}}{8760} = 0,99998.$$

Коэффициент готовности к обеспечению расчетного водоснабжения  $j$ -го потребителя:

$$K_j = p_0 + \sum_{f \in F_i} p_f$$

$$K_j = \prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)^{-1} \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^n \sum_{f \in F_i} \gamma_i \right),$$

где  $p_0$  – стационарная вероятность рабочего

<sup>2</sup>СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Введ.01.01.1985.

состояния сети;  $p_i$  – вероятность состояния сети, соответствующая отказу  $i$ -го элемента;  $F_j$  – множество элементов водопроводной сети, выход которых в аварию не нарушает расчетный уровень водоснабжения  $j$ -го потребителя;  $p_f$  – вероятность состояния сети,

соответствующая отказу  $f$ -го элемента,  $\gamma_i = \lambda_i / \mu_i$ ;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов трубопровода, 1/(км·год);  $\mu_i$  – интенсивность восстановления трубопровода, 1/год.

С учетом нормального закона распределения (функции Лапласа)

$$K_j = \prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)^{-1} \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{f \in F_i}^{24} \left( (0,5 \pm \Phi(-3 + \alpha_s/3)) + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot (0,5 \pm \Phi(-3 + \alpha_s/3)) \right) \text{ при } Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} = Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$$

Для вычисления  $K_j$  определяется площадь отсекаемой фигуры в пределах  $[Q_{j,0,t}, \dots, Q_{j,\alpha_s,t}]$  (см. рис. 1).

**Вероятность безотказного водоснабжения  $j$ -го потребителя**

$P_j$  – вероятность обеспечения  $j$ -го потребителя не ниже минимально допустимого значения:

$$P_j = \exp \left( - \left[ p_0 \cdot \sum_{d \in D_j} (\lambda_d l_d \tau_{j,d}) \right] \right),$$

где  $D_j$  – множество элементов водопроводной сети, выход которых в аварию нарушает пониженный уровень водоснабжения  $j$ -го потребителя;  $\tau_{j,d}$  – продолжительность обеспечения потребителя  $j$  водой ниже минимально допустимого значения

$\tau_{j,d} = T \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{24} (1 - \rho_{j,i})$ ;  $T$  – продолжительность исследуемого периода, год;  $\rho_{j,i}$  – вероятность часового обеспечения  $j$  потребителя, при  $\bar{q}_{j,k} \geq \varphi_k^{ab}$ ,  $k \in F_j^k$ , где

$\bar{q}_{j,k}$  – относительный (к расчетному расходу) часовой расход воды у  $j$ -го потребителя при отказе  $j$ -го элемента кольцевой части сети;  $F_j^k$  – множество участков кольцевой части водопроводной сети, гидравлически связанных с  $j$ -м потребителем;  $\varphi_k^{ab}$  – норма подачи воды потребителям в аварийных ситуациях. В данном случае обеспечение потребителя со снижением не более 30%.

**Вероятность безотказного снабжения  $j$ -го потребителя водой**

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

с учетом нормального закона распределения (функции Лапласа)

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

При  $Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}} < 0,7 \cdot Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$ , где  $i$  – отключаемый участок;  $n$  – количество участков;  $T$  – исследуемый час;  $\gamma_i = \lambda_i / \mu_i$ ;

$Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{треб}}$  – требуемый отбор воды потребителем  $j$  по сечению  $\alpha_s$  по часу  $t$ ;

$Q_{j,\alpha_s,t}^{\text{нефикс}}$  – отбор воды потребителем  $j$  по сечению  $\alpha_s$  по часу  $t$  по результатам гидравлического расчета.

Для вычисления  $P_j$  определяется площадь отсекаемой фигуры в пределах  $[Q_{j,\alpha_s,t}, \dots, Q_{j,18,t}]$  (рис. 1).

**Описание методики**

1. Определение значений требуемых

отборов воды потребителями по каждому  $\alpha_s$ -сечению  $[0, \dots, 18]$  и по каждому часу  $t$   $[0, \dots, 24]$ .

2. Проведение потокораспределений для безаварийных и аварийных режимов работы СПРВ отборам каждого  $\alpha_s$ -сечения каждого часа  $t$ .

3. Оценка узловых отборов воды после каждого потокораспределения.

Если потребитель (узел) получает требуемый расход по рассматриваемому  $\alpha_s$ -сечению, его обеспечение для этого состояния будет считаться надежным. Производится переход к следующему  $\alpha_s$ -сечению (рис. 2).

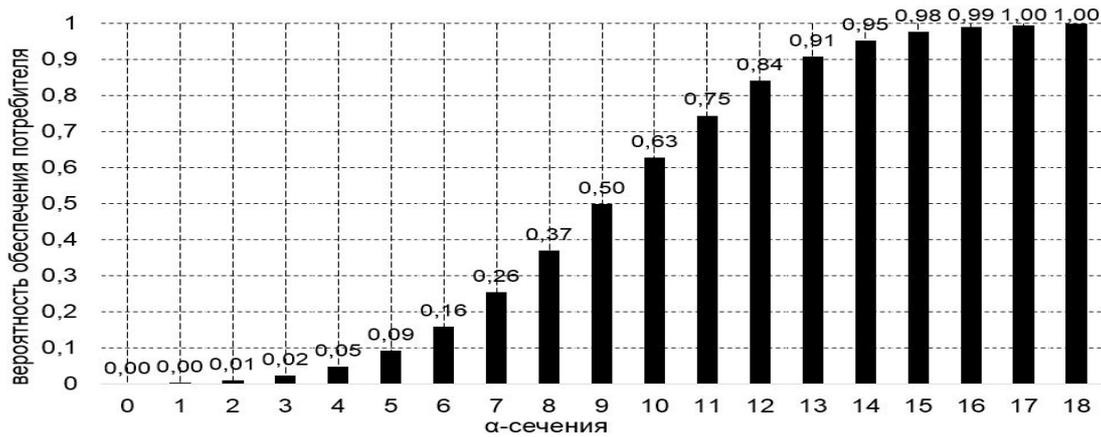


Рис. 2. Определение вероятности обеспечения потребителя  
 Fig. 2. Determination of the probability of providing the consumer

4. При получении расхода воды потребителем меньше требуемого для рассматриваемого  $\alpha_s$ -сечения расход с предыдущего  $\alpha_s$ -сечения и вероятность его наступления фиксируются.

Вероятность обеспечения потребителя (узла) рассматриваемого режима равна произведению вероятности наступления режима на вероятность обеспечения потребителя.

*Формирование показателей надежности обеспечения потребителей*

После проведения серии гидравлических расчетов  $24 \cdot 19 \cdot (N + 1) = 546 \cdot (N + 1)$  для каждого потребителя путем сложения произведений вероятностей обеспечения потребителей в каждом режиме на соответствующие вероятности наступления этих режимов производится формирование обобщенных показателей надежности обеспечения водой:

$$K_j = \frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left( \rho_{j,t,безав}^{обесп} \cdot \rho_0 + \sum_{i=1}^n \left( \rho_{j,t,i}^{обесп} \cdot \rho_{омкз,i} \right) \right)$$

$$P_j = \exp \left( - \frac{1}{24} \cdot \rho_0 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n \lambda_d \cdot \tau_{j,t} \right).$$

При сопоставлении узловых показателей надежности, полученных по результатам гидравлического расчета, с нормируемыми значениями  $K_j \geq K_j(\text{норм})$ ,  $P_j \geq P_j(\text{норм})$  делается вывод о надежности СПРВ.

На основе данной методики на кафедре городского строительства и хозяйства ИРНТУ для ЭВМ разработана «Программа по оценке надежности обеспечения потребителей водой», которая реализована в среде Fortran<sup>3</sup> и внесена в Реестр программ для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент).

Программа позволяет:

- произвести разбивку (сечения) вероятностных отборов воды каждого потребителя (узла) в пределах трех среднеквадратических отклонений от математического ожидания в течение каждого часа, используя элементы статистики (математическое ожидание отборов, среднеквадратическое отклонение, свойства нормального закона распределения случайных величин); смоделировать часовые отборы воды потребителями при каждом сечении;
  - определить вероятность нахождения участков в безаварийном и аварийных состояниях, используя интенсивность отказов и интенсивность восстановления участков;
  - на основе часовых отборов воды потребителями (узлов) (по  $\alpha_s$  – сечениям) сформировать режимы работы системы, смоделировав ординарный поток отказов в системе, определив вероятность нахождения системы в безаварийном и аварийных состояниях;
  - провести потокораспределения по каждому режиму, накапливая информацию по параметрам;
  - определить расчетные и пониженные уровни обеспечения потребителей на основе потокораспределений, сопоставляя расчетные и требуемые значения отборов воды при каждом режиме;
  - по расчетным и пониженным уровням обеспечения потребителей сформировать обобщенные показатели надежности и сопоставить их с нормируемыми значениями.
- На примере СПРВ микрорайона Иркутск-II г. Иркутска проведена апробация разработанной методики и программы для ЭВМ. Схема системы представлена на рис. 3 и 4 в обобщенной и узловой формах.

<sup>3</sup>Чупин В.Р., Душин А.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615619 от 27 мая 2020 г.

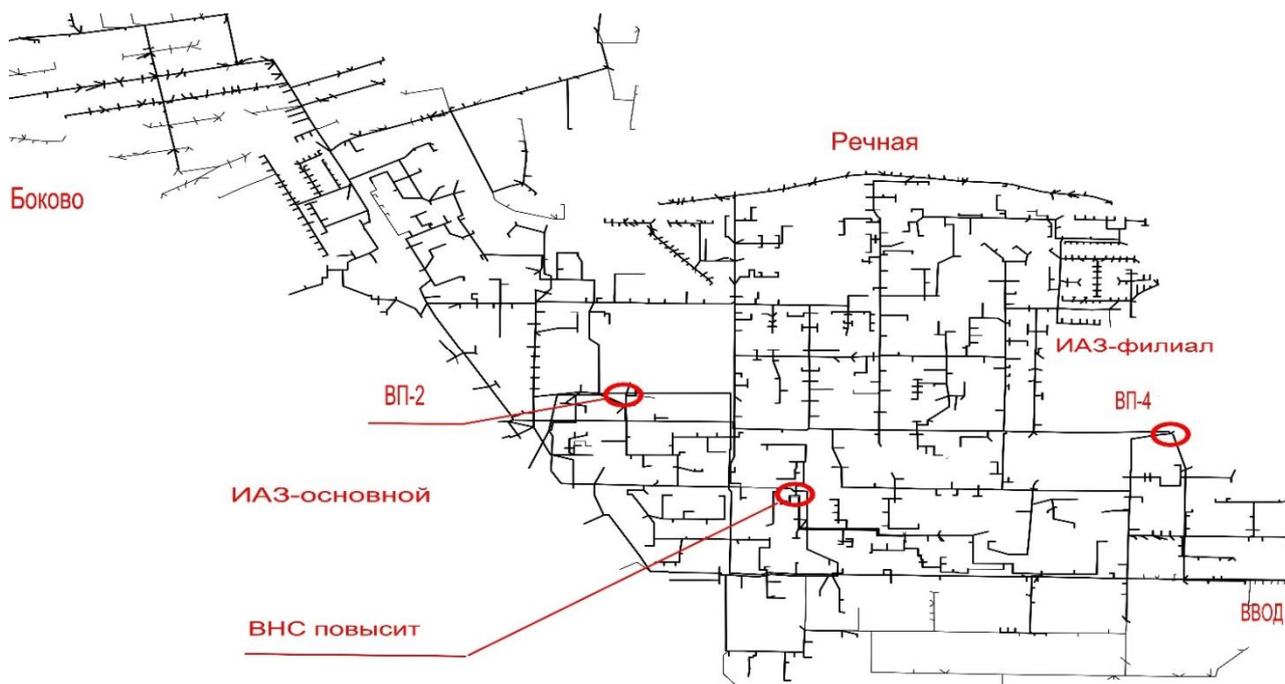


Рис. 3. Схема водопроводных сетей Иркутска-II (в обобщенной форме)  
 Fig. 3. Scheme of water supply networks of Irkutsk-II (in a generalized form)

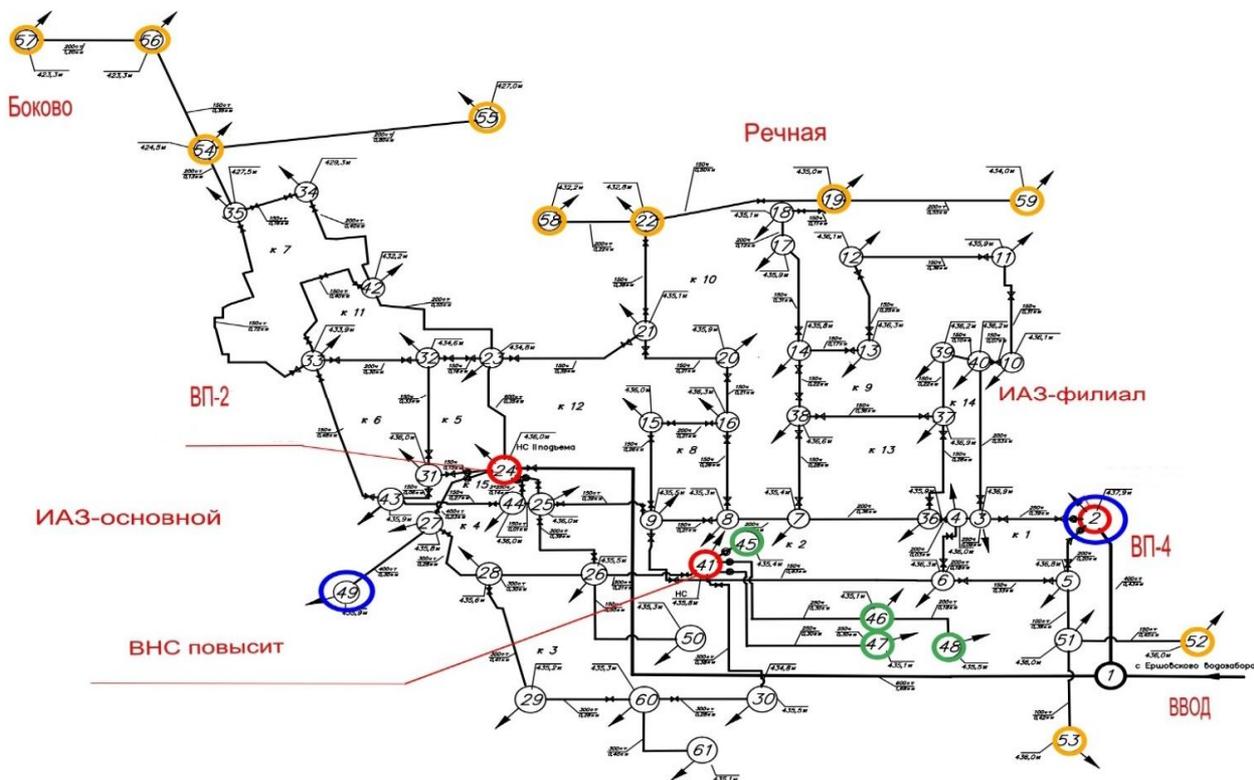


Рис. 4. Схема водопроводных сетей Иркутска-II (в узловой форме)  
 Fig. 4. Scheme of water supply networks of Irkutsk-II (in nodal form)

Особенности СПРВ микрорайона Иркутск-II

Водоснабжение микрорайона Иркутск-II осуществляется от общего коллектора, питающегося по двум вводам от городских сетей водоснабжения, расположенным по ул. Ленинградская (схема представлена на рис. 4).

В системе водоснабжения работают две основные станции водоподъема ВП-2 (узел № 24) и ВП-4 (узел № 2), повысительная станция, находящаяся на пересечении улиц Мира и Муравьева (узел № 41). ВП-2 и повысительная станция расположены на территории жилого массива, ВП-4 на территории Иркутского авиационного завода (ИАЗ). Основная территория ИАЗ (узел № 49) и филиал (узел № 2) на рис. 4 обозначены синим цветом.

От станции ВП-2 питаются в основном центр и районы северо-восточной части Иркутска-II в направлении пос. Боково (узел № 57), а также северо-западные окраины улиц Мира, Волгоградской и Ленинградской и дома по ул. Речная (узел № 19).

От станции ВП-4 питаются центр, а также районы юго-восточной и юго-западной частей Иркутска-II. По существующим переключкам от одной из станций водоподъема вода может быть подана в смежные районы, находящиеся в «зоне ответственности» другой станции.

Повысительная станция работает последовательно по отношению к основным станциям водоподъема и обеспечивает необходимый напор в многоэтажных домах, находящихся на улицах Мира, Волгоградская, Ленинградская (узлы № 45–48, обозначен-

ные на рис. 4 зеленым цветом). Объекты частного сектора на рис. 4 обозначены оранжевым цветом.

Для определения нагрузок при проведении расчетов использованы статистические данные об водопотреблении микрорайона Иркутск-II за 2017 г.

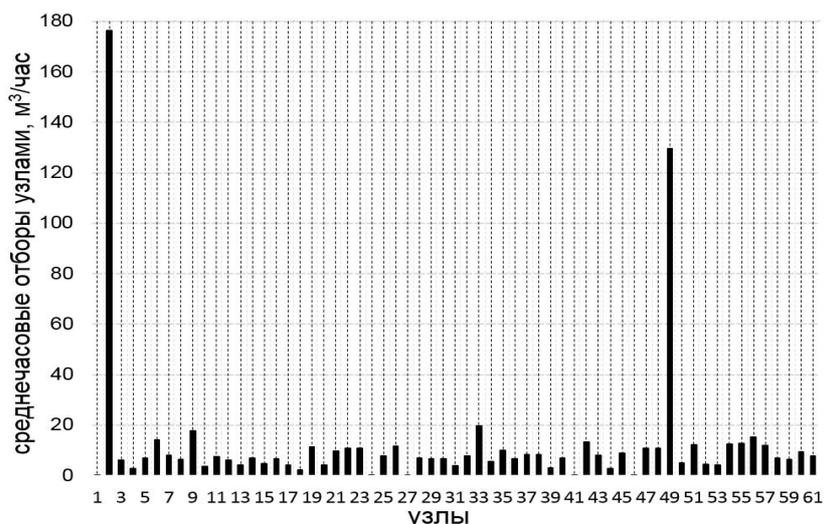
Информация об общем водопотреблении микрорайона Иркутск-II представлена на гистограмме (рис. 5). Распределение среднечасовых отборов воды узлами (м<sup>3</sup>/ч) представлено на рис. 6. Повышенные отборы воды узлами № 2 и № 49 связаны не только с отборами на нужды ИАЗ. На основной территории ИАЗ и на территории филиала ИАЗ расположены котельные № 1, 2 и 3, питающие нужды горячего водоснабжения и отопления как самого завода, так и жилого массива, причем котельные № 1 и 2 (узел № 49), работающие на мазуте, – это 1/3 жилого массива, котельная № 3 (узел № 2), работающая на угле, – это 2/3 жилого массива.

График отношений часовых значений математических ожиданий отборов воды узлами к средним значениям отборов этих узлов  $\bar{Q}_t / Q_{средн}$  представлено на рис. 7.

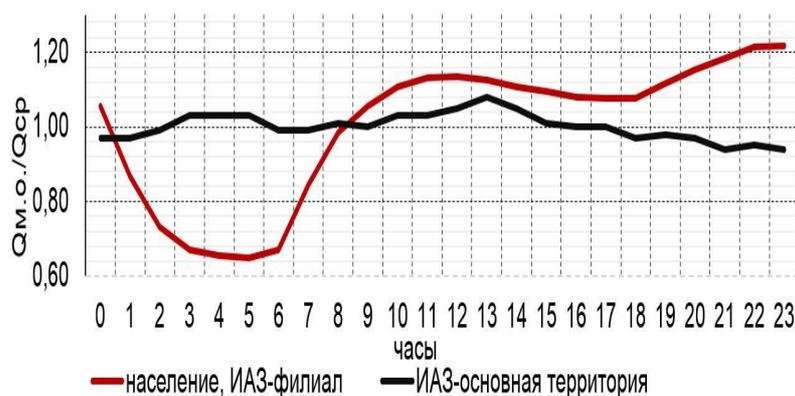
По результатам обработки статистических материалов (2006–2017 г.) по авариям на участках водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II, характеристик сети определены интенсивности отказов на участках. Распределение интенсивности отказов по материалам и диаметрам представлено на рис. 8. Распределение интенсивности отказов использовано при определении вероятности нахождения участков и системы в целом в безаварийном и аварийных состояниях.

м <sup>3</sup> /час	часы																								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1064	1120							0	0	0	0							0			0	0			
1008	1064						0	0			1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
952	1008									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1			
896	952						0	0	1	1	1	1	1	0	0	0		0		1	3	2	1	1	
840	896	1						1	1	1	1	0		1	1	0	1	1	1	3	5	8	3	1	
784	840					0	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	5	9	12	8	1	
728	784	1	1	1	1	0	1	5	9	4	6	9	13	13	9	6	5	5	5	8	20	28	34	39	3
672	728	0		0			29	37	34	35	41	40	39	34	24	15	14	19	35	42	33	26	29	11	
616	672	1	1	1	1	1	1	23	15	26	42	39	37	39	46	48	53	58	58	42	20	15	11	14	43
560	616	5	0	0	0	1		9	10	19	8	5	4	3	6	16	21	16	14	8	6	4	4	4	33
504	560	28	2	1	0		2	7	10	10	3	2	1	1	1	3	3	2	1	1	1	1	1	1	7
448	504	52	28	8	5	3	27	9	12	3	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	
392	448	11	54	52	40	39	37	10	3	1						0	0							1	
336	392	1	12	32	46	48	28	4	1								1								
280	336	1	2	4	6	8	3	1			0						0								
224	280		0	1	1	1	1																		
168	224			0	0	0																			

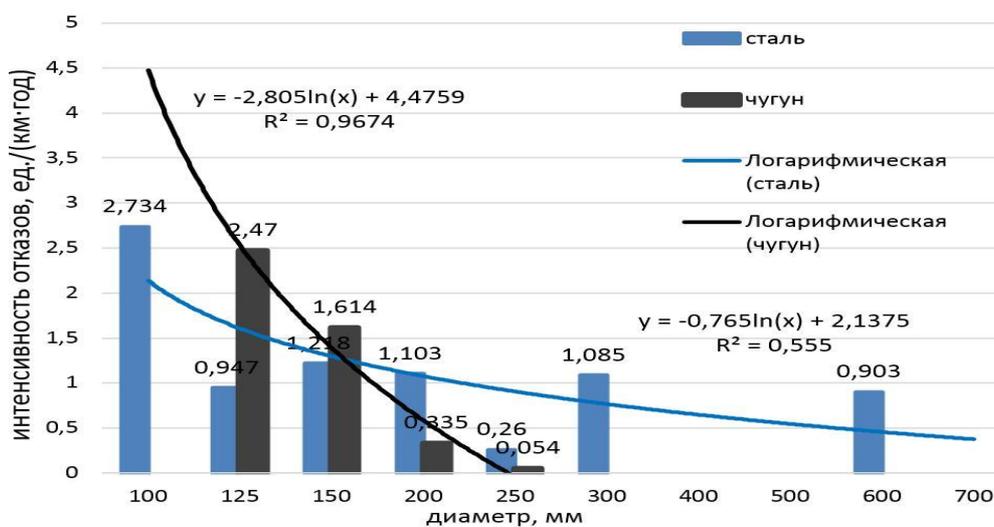
Рис. 5. Распределение вероятности отборов воды по часам суток в микрорайоне Иркутск-II за 2017 г.  
Fig. 5. Distribution of water sampling probabilities by hours of the day in the microdistrict Irkutsk-II for 2017



**Рис. 6.** Распределение среднечасовых отборов воды узлами  
**Fig. 6.** Distribution of average hourly water withdrawals by nodes



**Рис. 7.** Отношение среднечасовых значений математических отборов воды к среднему значению  $\bar{Q}_t / Q_{ср}$   
**Fig. 7.** The ratio of the hourly average values of mathematical water withdrawals to the average value  $\bar{Q}_t / Q_{ср}$



**Рис. 8.** Распределение интенсивности отказов на водопроводных сетях микрорайона Иркутск-II за 2006–2017 гг.  
**Fig. 8.** Distribution of the failure rate on the water supply networks of Irkutsk-II microdistrict for 2006–2017

**Результаты проведенных расчетов**

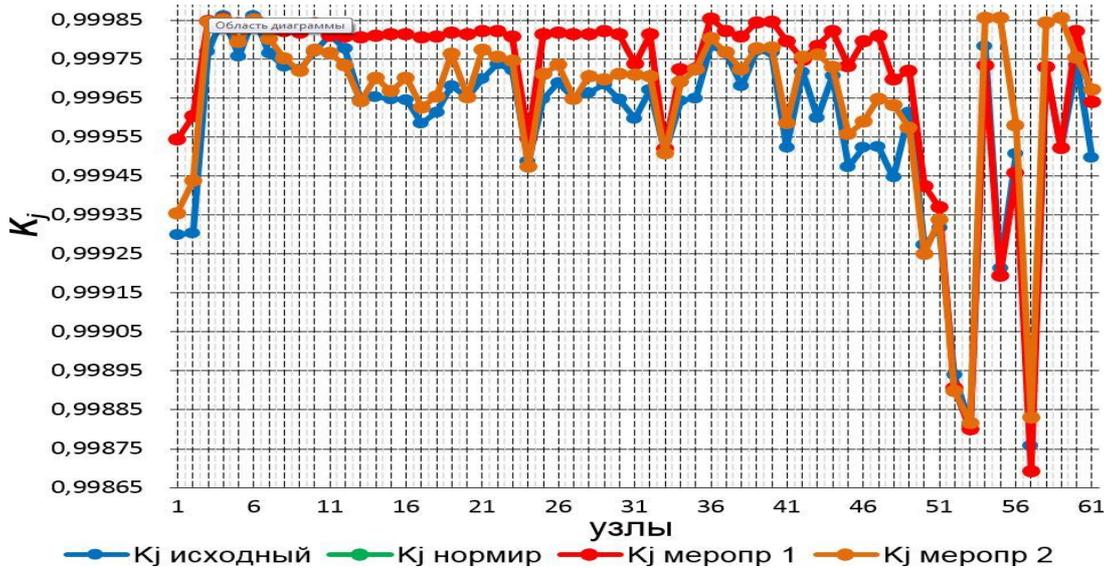
По представленной методике и программе для ЭВМ произведен расчет показателей надежности обеспечения потребителей водой для каждого узла расчетной схемы микрорайона Иркутск-II. Результаты определения показателей представлены по вариантам:

1. Существующий вариант работы системы (исходный) – синий цвет;

2. Вариант работы системы с увеличением пропускной способности участков трубопровода (мероприятие 1 – увеличение диаметров отдельных участков) – красный цвет;

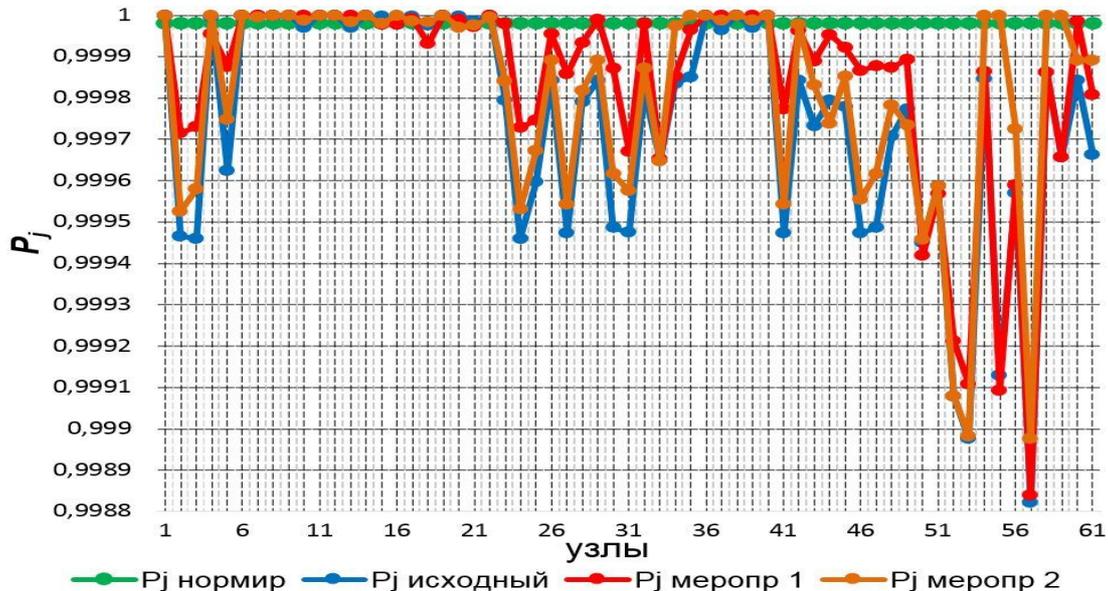
3. Вариант работы системы со структурным резервированием (мероприятие 2 – кольцевание тупиковых участков) – оранжевый цвет.

Обобщенные показатели надежности  $K_j$ ,  $P_j$ , полученные по результатам расчетов, по исходному варианту и проведенными мероприятиями отображены на рис. 9 и 10.



**Рис. 9.** Распределение коэффициентов готовности к обеспечению расчетного водоснабжения потребителей в микрорайоне Иркутск-II

**Fig. 9.** Distribution of the coefficients of readiness to provide calculated water supply to consumers in Irkutsk-II microdistrict



**Рис. 10.** Распределение вероятностей безотказного водоснабжения потребителей в микрорайоне Иркутск-II

**Fig. 10.** Distribution of probabilities of trouble-free water supply to consumers in Irkutsk-II microdistrict

Нормируемые показатели надежности составляют  $K_j(\text{норм}) = 0,99178$ ,  $P_j(\text{норм}) = 0,99998$ .

При сопоставлении показателей надежности, полученных по результатам расчета, с нормируемыми сделаны выводы:

- значения коэффициентов готовности обеспечения потребителей  $K_j$  по всем потребителям выше нормативных, а значит, обеспечение потребителей требуемым расчетным количеством воды не нарушается по времени выше допустимых пределов;

- пониженные значения вероятности безотказного водоснабжения потребителей  $P_j$  указывают на повышенный риск необеспечения потребителей в связи с отсутствием резервных линий по обеспечению потребителя или неспособностью резервных линий в случае отключения основной линии обеспечить потребителя аварийным количеством воды;

- повышенную надежность обеспечения имеют узлы № 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 38, которые расположены на границе зон влияния насосных станций ВП-2 и ВП-4 (в середине микрорайона Иркутск-II). В случае отключения любой из насосных станций эти узлы гарантированно будут качественно обеспечены водой, оставшейся в работе станции. На рис. 11 потребители с надеж-

ным обеспечением выделены зеленым цветом.

- надежность обеспечения потребителей, подключенных от тупиковых участков, имеет пониженное качество обеспечения (узлы № 57, 56, 54, 55, 51, 52, 53, 58, 59 – частный сектор; узлы № 61, 50, 48 – многоквартирные дома, узел № 49 – ИАЗ – основная территория). На рис. 11 потребители, подключенные от тупиковых участков, выделены синим цветом.

- пониженное качество обеспечения потребителей, подключенных от кольцевых участков (узлы № 23, 24, 26, 27, 28, 46, 47, 44, 42, 43, 41, 39, 10, 13, 18, 60), обусловлено малой пропускной способностью участков ( $D_{25-9} = 150$  мм,  $D_{9-8} = 150$  мм) при перераспределении потоков в случае отключения одной из насосных станций (ВП-2 или ВП-4). Также пониженное качество обеспечения узла 49 – ИАЗ – основная территория через узел № 27 обусловлено тем, что обеспечение больших потребностей воды для ИАЗ достигается через 1 участок (24–27) диаметром 400 мм, обводной участок 28–27 более протяженный и имеет пониженный диаметр 300 мм. В случае отключения по причине аварии участка 24–27, участок 28–27 не может обеспечить полную потребность в воде. На рис. 11 потребители с пониженной обеспеченностью водой, подключенные от кольцевой сети, выделены оранжевым цветом.

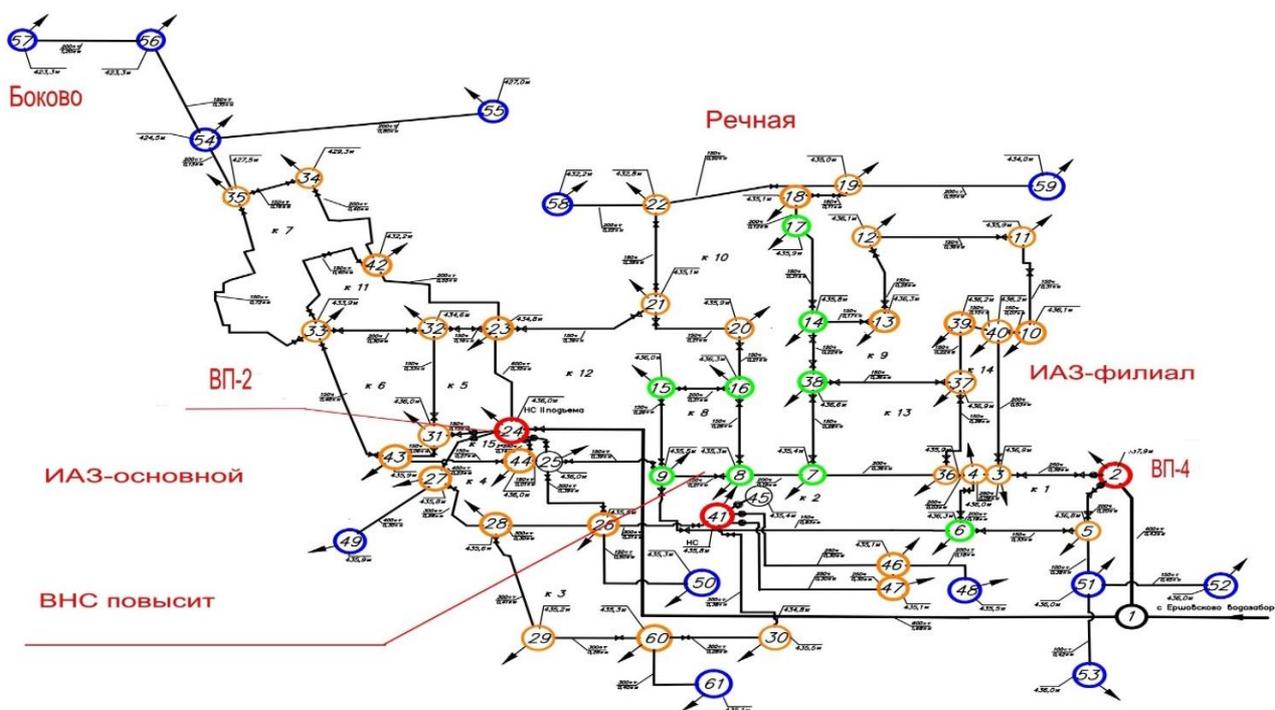


Рис. 11. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутска-II (оценка обеспечения потребителей водой)  
Fig. 11. Scheme of water supply networks of Irkutsk-II microdistrict (assessment of water supply to consumers)

Подключение новых потребителей будет вызывать ухудшение качества обеспечения существующих потребителей (особенно потребителей частного сектора, подключенных от тупиковых участков сети большой протяженности, например, пос. Боково – узел № 57). Также для районов частного сектора характерно резкое увеличение потребления воды с наступлением весенне-летнего периода, связанное с включением летних водопроводов и регулярными поливами на приусадебных участках. Положительным моментом, улучшающим качество обеспечения потребителей пос. Боково, является пониженный рельеф местности. С учетом планов развития и новых поступающих заявок на подключение необходима дополнительная реконструкция сети с увеличением диаметров трубопровода на ее отдельных участках.

Подобная оценка надежности работы сети может проводиться ежемесячно. Изменение объемов потребления и количества аварий по сезонам будет давать разную картину обеспечения потребителей.

#### Разработка мероприятий

Повышенные значения коэффициента готовности по потребителям  $j$ :  $K_j \geq K_{j(норм)}$  – указывают на то, что повышение надежно-

сти резервированием участков можно проводить без повышения напоров на насосных станциях (без дополнительных затрат на электроэнергию). Наряду с исследованием работы существующего варианта системы водоснабжения рассмотрены варианты оптимизации. Схема водопроводных сетей (в узловой форме) с проведением мероприятий представлена на рис. 12.

**Мероприятие 1.** Увеличение пропускной способности участков трубопровода 25-9, 9-8. Увеличение диаметра участков со 150 мм до 250 мм. На рис. 12 указанные участки выделены оранжевым цветом.

Результаты вычислений представлены на рис. 9 и 10:  $K_{меропр 1}$ ,  $P_{меропр 1}$  – выделены красным цветом.

Наблюдается увеличение надежности потребителей – узлов № 23, 24, 27, 28, 26, 46, 47, 44, 42, 43, 41, 39, 10, 13, 18, 60.

**Мероприятие 2.** Структурное резервирование. Кольцевание тупиковых участков.

Создание участков 30-61, 58-55, 11-59 (кольцевание) позволит увеличить надежность обеспечения потребителей частного сектора (узлы № 55 – ул. Юрия Смирнова, № 58 – ул. Речная, № 59 – ул. Речная, № 61 – ул. Почтамтская), повысит качество обеспечения противопожарных нужд, даст техническую возможность подключения новых потребителей.

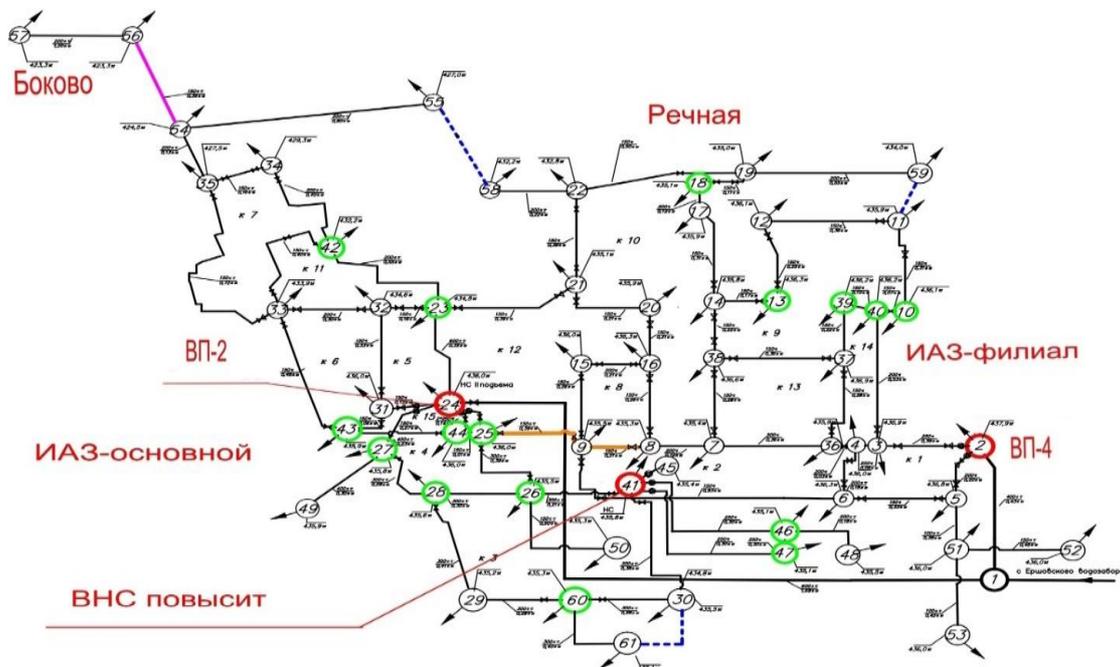


Рис. 12. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутска-II (с мероприятиями)  
 Fig. 12. Scheme of water supply networks of Irkutsk-II microdistrict (with events)

На рис. 12 указанные участки выделены синим цветом.

Для повышения качества обеспечения потребителей поселка Боково (узел 57) рекомендуется участок сети узлы 54–56 заменить с увеличением диаметра со 150 мм до 200 мм или проложить дополнительно новую линию. На рис. 12 указанный участок выделен фиолетовым цветом.

Результаты вычислений показателей по мероприятию 2 отображены на рис. 9 и 10:  $K_{\text{меропр 2}}$  и  $P_{\text{меропр 2}}$  выделены оранжевым цветом.

#### **Заключение**

В результате проведенных расчетов:

1. Произведена оценка эксплуатационной надежности СПРВ.
2. Выявлены участки сети, наиболее негативно влияющие на качество обеспечения потребителей в системе.
3. Проведена оценка запаса пропускной способности системы по отдельным направлениям.
4. Предложены мероприятия по оптимизации работы системы.

Разработанная методика по оценке эксплуатационной надежности СПРВ – современный и эффективный инструмент для ре-

шения многих эксплуатационных и проектных задач содержания и развития систем водоснабжения.

В основе этой методики применяются электронные модели, методы расчета гидравлических параметров, численное моделирование и оптимизация технических решений.

Методика позволяет вычислить вероятностные показатели функционирования СПРВ, на основе которых возможен анализ существующих условий эксплуатации СПРВ, разработка мероприятий по ее оптимизации.

Преимуществом вероятностного моделирования, отвечающего адекватностью реальным процессам функционирования системы, является возможность: более точно оценить степень надежности обеспечения потребителей водой; указать места возникновения новых диктующих точек; разработки более точных правил управления СПРВ.

Разработанная по методике программа ЭВМ позволяет моделировать различные режимы эксплуатации, оценивать работоспособность, надежность и режимную управляемость систем водоснабжения. На примере системы водоснабжения микрорайона Иркутск-II показана эффективность разработанной методики и программы для ЭВМ.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Карамбиров С.Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. М.: МГУП, 2004. 197 с.
2. Гальперин Е.М. Надежностные расчеты кольцевых водопроводных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 3. С. 26–29.
3. Игнатчик С.Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортировки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 8. С. 56–63.
4. Карамбиров С.Н., Буркова Ю.Г. Анализ и синтез сложных инженерных систем с применением современных математических методов: монография. М.: Изд-во Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. 193 с.
5. Поршнева В.Н., Привен Е.М., Битиев А.В. Принципы обеспечения надежности функционирования системы водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 7-1. С. 40–43.
6. Новицкий Н.Н., Вантеева О.В. Анализ гидравлических режимов в трубопроводных системах в условиях вероятностного характера узловых граничных условий // Вестник ИРГТУ. 2017. Т. 21. № 8 (127). С. 130–142. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-130-142>
7. Карамбиров С.Н., Бекишева Л.Б. О некоторых статистических закономерностях водопотребления в системах водоснабжения // Природообустройство. 2012. №4. С. 45–48.
8. Карамбиров С.Н., Буркова Ю.Г. Оптимизация систем подачи и распределения воды методом линейного программирования // Природообустройство. 2008. №2. С. 101–107.
9. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
10. Чупин В.Р., Душин А.С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 12. С. 35–42.
11. Чупин В.Р., Душин А.С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой. Разработка показателей надежности водоснабжения потребителей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. № 3 (30). 2019. С. 578–593. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-578-593>

12. 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. №4 (31). 2019. С. 790–803. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-790-803>
13. Сеннова Е.В., Кирюхин С.Н. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов. М.: ОАО «Газпром промгаз», 2013. 104 с.
14. Дерюшева Н.Л., Дерюшев Л.Г. О нормировании надежности и производительности сооружений систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 11. С. 48–51.
15. Найманов А.Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 12. С. 11–16.
16. Чупин В.Р., Мелехов Е.С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. Иркутск: Изд-во 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. Майзель И.В., Бобер В.А. Интенсификация работы систем водоснабжения и водоотведения г. Нижнеудинска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. №4 (35). С. 578–587. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-578-587>

## REFERENCES

1. Karambirov SN. Mathematical modeling of water supply and distribution systems under multimode and uncertainty conditions. Moscow: Moscow State University of Environmental Engineering; 2004; 197 p. (In Russ.)
2. Galperin EM. Reliability Calculations for Ring Water Supply Systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2003;8:26–29. (In Russ.)
3. Ignatchik SYu. Ensuring reliability and energy saving in the design of structures for the transportation of wastewater. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2010;8:56–63. (In Russ.)
4. Karambirov SN, Burkova YuG. Analysis and synthesis of complex engineering systems using modern mathematical methods. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 2016. 193 p.
5. Porshnev VN, Priven EM, Bitiev AV. Principles of ensuring of water supply system operation reliability. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2007;7-1:40–43. (In Russ.)
6. Novitsky NN, Vanteeva OV. Analysis of pipeline system hydraulic regimes under the conditions of probabilistic character of node boundary conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2017;21(8):130–142. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-130-142>
7. Karambirov SN, Bekisheva LB. About some statistical regularities of water consumption in water supply systems. *Prirodoobustroistvo*. 2012;4:45–48.
8. Karambirov SN, Burkova YuG. Optimization of systems of water supply and distribution by means of the linear programming methods. *Prirodoobustroistvo*. 2008;2:101–107.
9. Kremer NSh. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: YuNITI-DANA; 2004; 573 p.
10. Chupin VR, Dushin AS. Assessment of the customer water supply reliability. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2017;12:35–44. (In Russ.)
11. Chupin VR, Dushin AS. Assessment of the reliability of water supply to consumers: water supply 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>
12. 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>
13. Sennova EV, Kiryukhin SN. Method and algorithm for calculating the reliability of heat networks in the development of schemes heat supply of the cities. Moscow: Gazprom promgaz; 2013. 104 p. (In Russ.)
14. Deryusheva NL, Deryushev LG. On standardization of reliability and capacity of water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2011;11:48–51. (In Russ.)

15. Naymanov AYa. Features of Reliability Evaluation of Ring Water Supply System. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2006;12:11–16. (In Russ.)

16. Chupin RV, Melekhov ES. Development of theory and practice of modeling and optimization of water supply and sanitation systems. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011. 323 p. (In Russ.)

17. Chupin VR, Malevskaya MB. Development of recommendations to minimize the conse-

quences of emergencies in water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 1994;4:8–9. (In Russ.)

18. Maizel IV, Bober VA. Intensification of water supply and sanitation systems in the city of Nizhneudinsk. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(4):578–587. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-578-587>

### Сведения об авторах

#### Чупин Виктор Романович,

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

#### Душин Алексей Сергеевич,

инженер-строитель,  
ООО «Сетевая компания «ИРКУТ»»,  
664020, г. Иркутск, ул. Авиастроителей, 28А,  
Россия,  
✉e-mail: [a.s.dushin@mail.ru](mailto:a.s.dushin@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-5167>

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 17.12.2020.  
Одобрена после рецензирования 14.01.2021.  
Принята к публикации 18.01.2021.

### Information about the authors

#### Victor R. Chupin,

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

#### Aleksei S. Dushin,

Civil engineer,  
ООО «Network company «ИРКУТ»»,  
28А Aviastrouteley St., Irkutsk 664020, Russia,  
✉e-mail: [a.s.dushin@mail.ru](mailto:a.s.dushin@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-5167>

### Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

### Conflict of interests

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

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

The article was submitted 17.12.2020.  
Approved after reviewing 14.01.2021.  
Accepted for publication 18.01.2021.