



**Оценка надежности снабжения водой потребителей
с учетом сезонных изменений условий функционирования системы
подачи и распределения воды**

Алексей Сергеевич Душин

ООО «Сетевая компания «ИРКУТ»», г. Иркутск, Россия, a.s.dushin@mail.ru

Аннотация. Цель – исследование надежности снабжения потребителей водой в условиях сезонных изменчивости водопотребления и интенсивности аварийных ситуаций на водопроводных сетях. В работе продемонстрировано, что показатели надежности в летний и зимний периоды работы систем подачи и распределения воды (СПРВ) имеют отличительные особенности. Для организации бесперебойного снабжения потребителей водой необходимо учитывать сезонную изменчивость показателей коэффициента готовности и вероятности безотказного снабжения водой потребителей (K_j , P_j) и добиваться оптимальных условий функционирования СПРВ в каждом исследуемом периоде их эксплуатации. Анализ статистической информации о потреблении воды за предыдущие периоды эксплуатации и оценка аварийности в СПРВ позволяют сделать прогнозы и составить модели функционирования СПРВ на последующие периоды их эксплуатации. На примере системы водоснабжения микрорайона Иркутск-II города Иркутска на основе разработанной методики оценки эксплуатационной надежности, электронных моделей и программы для ЭВМ проведено исследование показателей надежности СПРВ при различных режимах эксплуатации. Также изучено влияние интенсивности аварийных ситуаций в СПРВ (в количественном и хронологическом порядке) на отборы воды потребителями и их группами в течение сезона, года, в зависимости от территориального размещения абонентов в сети. На фактическом примере доказано влияние вышеперечисленных факторов на надежность обеспечения потребителей водой. По результатам исследования рекомендуется эксплуатационным организациям осуществлять контроль за изменением указанных показателей надежности в течении сезонов года, что, в свою очередь, позволит оценивать работоспособность, режимную управляемость системы и обеспечивает возможность повышения эффективности при оптимизации развития и реконструкции СПРВ.

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 СПРВ

Для цитирования: Душин А. С. Оценка надежности снабжения водой потребителей с учетом сезонных изменений условий функционирования системы подачи и распределения воды // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 624–637. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-624-637>.

Original article

Assessment of reliability of supplying water to consumers given the seasonal changes in operating conditions of water transmission and distribution network

Aleksei S. Dushin

ООО «Network company «IRKUT»», Irkutsk, Russia, a.s.dushin@mail.ru

Abstract. The study aims to evaluate the reliability of supplying water to consumers, given the seasonal variability in water consumption and the rate of emergencies in water distribution systems. It was shown that the reliability indexes associated with the operation of the water transmission and distribution network (WTD) exhibit distinctive characteristics in the summer and winter periods. To ensure an uninterrupted water supply to consumers, it is necessary to address the seasonal availability and probability of a reliable water supply (K_j , R_j) and to achieve optimal conditions for WTD functioning in each

investigated period of its operation. The statistical analysis of data on water consumption in the previous operation periods and the assessment of accidents on the WTD allow the functioning of the subsequent periods of their operation to be forecasted and modelled. On the example of the water supply system of the Irkutsk-II microdistrict (Irkutsk), the reliability of WTD was studied under various operating modes based on the developed methodology for assessing the operational reliability, electronic models and software. We also studied the influence of emergency rate in the WTD (in quantitative and chronological order) on the water consumption depending on the season, year and territorial distribution in the network. This example proves the influence of the above factors on the reliability of water supply to consumers. Based on the research results, it is recommended that operating entities monitor the change in the specified reliability indicators during the seasons of the year. This, in turn, will allow the operability and regime controllability of the system to be assessed and the efficiency to be improved by optimising the WTD development and reconstruction.

Keywords: 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, availability of water supply to consumers, optimization of water supply and distribution systems

For citation: Dushin A. S. Assessment of reliability of supplying water to consumers given the seasonal changes in operating conditions of water transmission and distribution network. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2021;11(4):624-637. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-624-637>.

Введение

Функционирование системы подачи и распределения воды (СПРВ) осуществляется в условиях постоянного изменения множества факторов, влияющих на режимы ее работы, а именно: стохастический процесс водопотребления, вероятностный характер отказов работы элементов системы, неопределенные внешние климатические, сейсмические и техногенные воздействия. Пренебрежение этими факторами на этапе формирования математических моделей, описывающих процесс функционирования СПРВ, вносит значительные погрешности в организацию и оптимизацию режимов работы системы в целом.

Поэтому обеспечение эффективной и качественной работы системы подачи и распределения воды может быть осуществлено только на основе использования современных информационных технологий анализа технического состояния объектов водоснабжения, их взаимосвязи между собой, формирования достоверных прогнозов отборов воды потребителями и динамики их изменения во времени [1–4].

Методы

Процессы и технологии моделирования водопотребления, возникновения и ликвидации аварийных ситуаций исследованы и изложены в публикациях¹ [5–21]. Разработка ме-

тодики оценки и повышения эксплуатационной надежности СПРВ, ее реализация в виде программного комплекса на ЭВМ является предметом исследования в настоящей работе. Подробное описание разработанной методики, математической модели вероятностных отборов воды и распределения потоков отражено в статьях [12–14, 20, 21] и кратко излагается ниже.

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 узла по часу t , согласно правилу 3 сигм (закон Гаусса), можно представить следующим образом:

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

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

где $\bar{Q}_t^{[\min]}$, $\bar{Q}_t^{[\max]}$ – математические ожидания отборов воды в час минимального и максимального потребления, $\sigma_{Q,t}^{[\min]}$, $\sigma_{Q,t}^{[\max]}$ – среднеквадратичные отклонения в час минимального и максимального потребления.

¹Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. М.: Кнорус, 2019. 496 с.;
Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

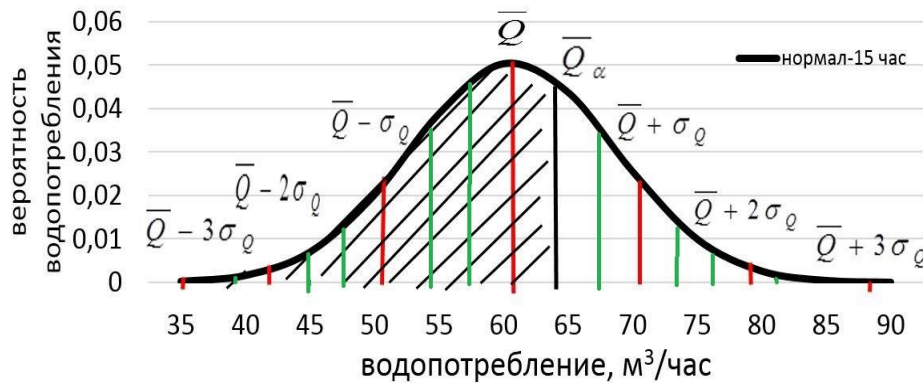


Рис. 1. Плотность распределения вероятности потребления воды по часу t
Fig. 1. Density of distribution of the probability of water consumption by hour t

Функция плотности распределения по часу t разбита на $k-18$ интервалов по сечениям $\alpha_s = 19$ с шагом $\sigma_{j,t}/3$. Отбор воды по сечению α_s составит:

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

Для описания плотности распределения вероятности потребления использован нормальный закон.

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-я система (с изменением структуры сети – ординарный поток отказов $i [1, \dots, n]$) – аварийные режимы.

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

где $A - (m-1) \cdot n$ – матрица соединений узлов и ветвей расчетной схемы сети с элементами a_{ij} ; A_{as} – усеченные матрицы, получаемые из A путем поочередного исключения элементов n_i , т.е. $A_{as} - (m-1) \times (n-1)$; $X - n$ – вектор расходов на ветвях расчетной схемы с элементами x_i ; $X_{as} - (n-1)$ – 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 – время (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.

Оценка качества снабжения потребителей водой производится показателями расчетного и пониженного уровня для каждого узла расчетной схемы j : K_j – коэффициент готовности к обеспечению расчетного водоснабжения j -го потребителя, P_j – вероятность безотказного водоснабжения j -го потребителя.

Подробное описание методики формирования указанных показателей надежности представлено в статьях [13, 14]. В данной работе указаны ее основные моменты.

Нормирование значений $K_j(\text{норм})$, $P_j(\text{норм})$ согласно СНиП 2.04.02-84 (1 категория): $t_{\text{сниж}} = 3$ сут со снижением до 30 %, $t_{\text{пер}} = 10$ мин – перерыв в подаче воды. Нормируемые показатели $K_j(\text{норм})$, $P_j(\text{норм})$ имеют отношение к расчетному времени (год). Количество минут в течение года составляет 8760.

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

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

При рассмотрении любого другого интервала времени нормируемые показатели $K_j(\text{норм})$, $P_j(\text{норм})$ в исследуемом временном интервале, например месяце, состоящем из 30 дней, можно представить при $t_{\text{сниж}} = 3 \cdot 30 / 365$, $t_{\text{пер}} = (10 / (60 \cdot 24)) \cdot 30 / 365$:

$$K_j(\text{норм}) = \frac{24 \cdot 30 - t_{\text{сниж}}}{24 \cdot 30} = \frac{720 - t_{\text{сниж}}^{\text{int}}}{720} = 0,99178,$$

$$P_j(\text{норм}) = \frac{24 \cdot 30 - t_{\text{неп}}}{24 \cdot 30} = \frac{720 - t_{\text{неп}}^{\text{int}}}{720} = 0,99998,$$

т.е. $K_j(\text{норм}) = K_j^{\text{int}}(\text{норм}) = 0,99178,$
 $P_j(\text{норм}) = P_j^{\text{int}}(\text{норм}) = 0,99998.$

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

где $\tau_{j,d}$ – продолжительность обеспечения потребителя j водой ниже минимально допустимого значения, λ – интенсивность отказов трубопровода, $1/(\text{км} \cdot \text{год})$, ρ_0 – стационарная вероятность рабочего состояния сети, $\rho_{j,t}^{\text{обесп}}$ – вероятность обеспечения потребителя j по часу t в аварийном или безаварийном состоянии.

По причине изменений удельного потребления воды в течение года, структурного изменения СПРВ в связи с проведением аварийно-восстановительных работ распределение перерывов в подаче воды и снижение допустимого уровня обеспечения потребителей происходят неравномерно. Следовательно, качество снабжения водой каждого потребителя в течение этого времени будет разным.

В данной работе сделан акцент на изменениях показателей K_j , P_j в исследуемых интервалах времени [22].

Учет колебаний этих показателей должен стать для эксплуатирующих организаций руководством к действию: непосредственно вы-

После проведения гидравлических расчетов путем сложения произведений вероятностей обеспечения потребителей в каждом режиме на соответствующие вероятности наступления этих режимов формируются обобщенные расчетные показатели K_j , P_j .

полнению своих основных функций – функций качественного снабжения потребителей – и поиску оптимальных условий функционирования СПРВ в каждом исследуемом периоде.

Разбивку года можно сделать по интервалам, например по месяцам, сезонам. Для каждого потребителя по временным интервалам образуется ряд параметров K_j^{int} , P_j^{int} . По этим показателям можно судить не только о качестве снабжения потребителей в разные интервалы, но и оценивать гибкость работы СПРВ и способность их адаптации к изменяющимся условиям функционирования под воздействием различных факторов.

Продолжительность года T разобьем на периоды t^{int} , имеющие по качеству функционирования СПРВ отличительные особенности, например, осенне-зимне-весенний (отопительный) и летний (подключение летнего водопровода) периоды. По своей продолжительности они неравнозначны (осенне-зимне-весенний ~ 265 дней, летний ~ 100 дней).

$$T = \sum_{t^{\text{int}}=1}^T t^{\text{int}} = t^{\text{осень, зима, весна}} + t^{\text{лето}} = 265 + 100 = 365.$$

Взаимосвязь расчетных величин по году K_j , P_j и по интервалам K_j^{int} , P_j^{int} представлена в следующем виде:

$$K_j = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t^{\text{int}}=1}^T K_j^{\text{int}} \cdot t^{\text{int}} = \frac{1}{T} \cdot (K_j^{\text{осень, зима, весна}} \cdot t^{\text{осень, зима, весна}} + K_j^{\text{лето}} \cdot t^{\text{лето}}) = \frac{1}{365} \cdot (K_j^{\text{осень, зима, весна}} \cdot 265 + K_j^{\text{лето}} \cdot 100);$$

$$P_j = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t^{\text{int}}=1}^T P_j^{\text{int}} \cdot t^{\text{int}} = \frac{1}{T} \cdot (P_j^{\text{осень, зима, весна}} \cdot t^{\text{осень, зима, весна}} + P_j^{\text{лето}} \cdot t^{\text{лето}}) = \frac{1}{365} \cdot (P_j^{\text{осень, зима, весна}} \cdot 265 + P_j^{\text{лето}} \cdot 100).$$

На примере СПРВ микрорайона Иркутск-II города Иркутска проведена апробация разработанной методики оценки и повышения эксплуатационной надежности СПРВ.

Схема системы представлена на рис. 2 и 3 в обобщенной и узловой формах.

Особенности системы подачи и распределения воды микрорайона Иркутск-II

Функционирование СПРВ микрорайона Иркутск-II более подробно рассмотрено в статье [20]. В настоящей работе описаны ее основные особенности.

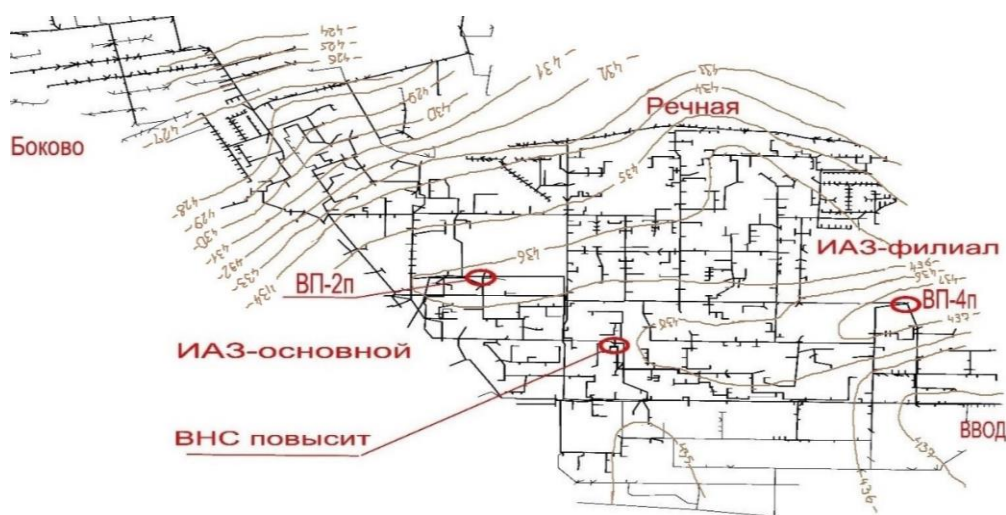


Рис. 2. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II (в обобщенной форме)
Fig. 2. Scheme of water supply networks of the Irkutsk-II microdistrict (in generalized form)

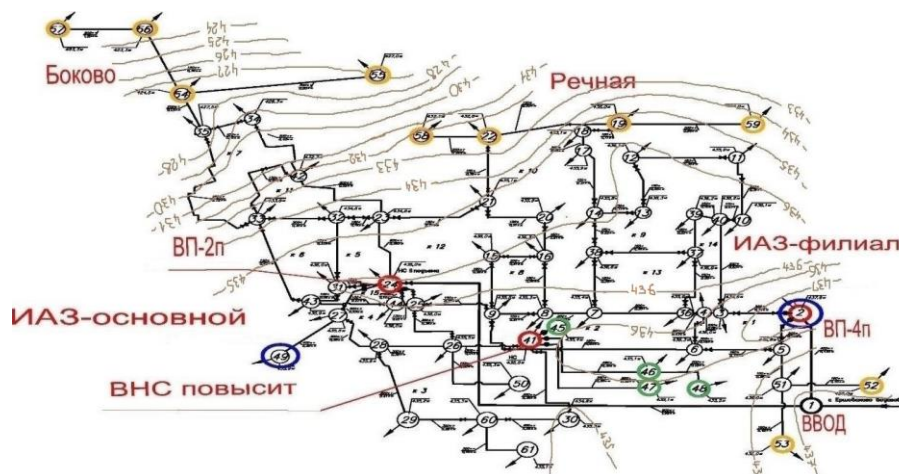


Рис. 3. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II (в узловой форме)
Fig. 3. Scheme of water supply networks of the Irkutsk-II microdistrict (in nodal form)

Согласно данным, предоставленным расчетно-кассовым центром ООО «Сетевая компания "ИРКУТ"», численность проживающего в микрорайоне населения составляет около 44 тысяч человек (по прописке), из которых около 40 тысяч человек – жители многоквартирных домов, 4 тысячи человек – жители частного сектора. В последнем 3,5 тысячи человек используют воду на нужды хозяйственно-питьевого водоснабжения:

- в зимний период с водоразборной колонки;
- в летний период с летнего водопровода.

Около 500 человек живут в частных домах, подключенных к зимнему водопроводу, и, соответственно, имеют повышенную степень благоустройства круглогодично.

Площадь полива в частном секторе в летний период составляет около 155 тыс. м².

Часть жителей, проживающих в зимний период в многоквартирных домах микрорайона Иркутск-II, в летний период, особенно в выходные, используют объекты частного сектора этого же района для фактического проживания и выращивания культур на приусадебных участках. Наблюдается некая миграция потребителей воды внутри района, что, несомненно, сказывается на перераспределении потоков в СПРВ и качестве снабжения потребителей.

Водоснабжение микрорайона Иркутск-II осуществляется от коллектора городских сетей, обозначенного на рис. 3 «ВВОД». В СПРВ работают две основные насосные станции – ВП-2 (узел № 24) и ВП-4 (узел № 2), повысительная станция (узел № 41) обозначена на рисунке красным цветом. Основная территория Иркутского авиационного завода (далее ИАЗ) (узел № 49) и филиал – дополнительная

территория (узел № 2) – на рис. 3 обозначены синим цветом. От ВП-2 в основном питаются центр и районы северо-восточной части Иркутска-II в направлении п. Боково (узел № 57), а также северо-западные оконечности 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 насосных станций вода может быть подана в смежные районы, находящиеся в «зоне ответственности» другой станции. Повысительная станция работает последовательно по отно-

шению к основным станциям и обеспечивает необходимый напор в многоэтажных домах (узлы № 45–48, обозначенные на рис. 3 зеленым цветом). Объекты частного сектора на рис. 3 выделены оранжевым цветом.

Согласно размещенным на территории микрорайона Иркутск-II коммерческим приборам учета холодной воды получены сведения о фактическом распределении отборов воды данным микрорайоном, основной территорией ИАЗ (узел № 49) и его дополнительной территорией (узел № 2). Схема размещения приборов представлена на рис. 4.

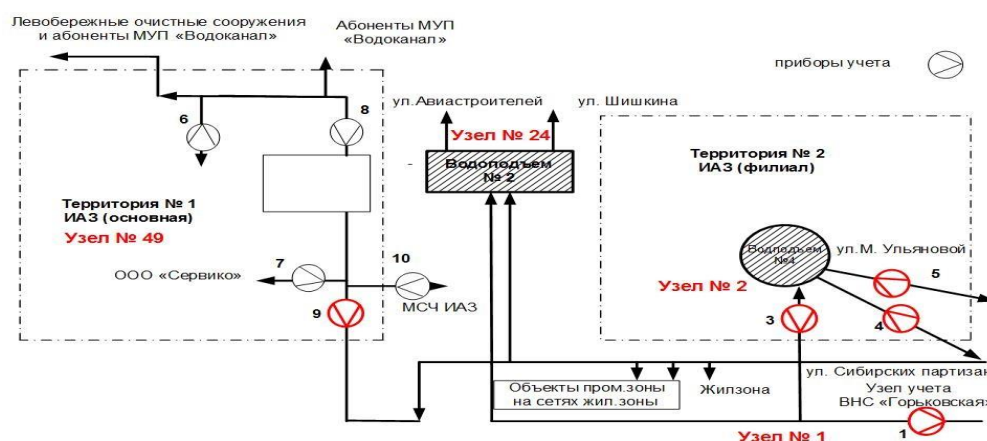


Рис. 4. Схема учета питьевой воды, потребленной Иркутским авиационным заводом – филиалом ПАО «Корпорация «Иркут»

Fig. 4. Scheme of accounting for drinking water consumed by the Irkutsk Aviation Plant - a branch of Irkut Corporation PJSC

Сведения об общем фактическом потреблении воды микрорайоном Иркутск-II за период 07.01.2016–02.10.2021 гг. получены с расходомера питающей Иркутск-II Горьковской насосной станции (на рис. 4 обозначен прибор

ром учета № 1), расположенной в поселке Селиваниха.

Распределение отборов воды представлено на рис. 5.

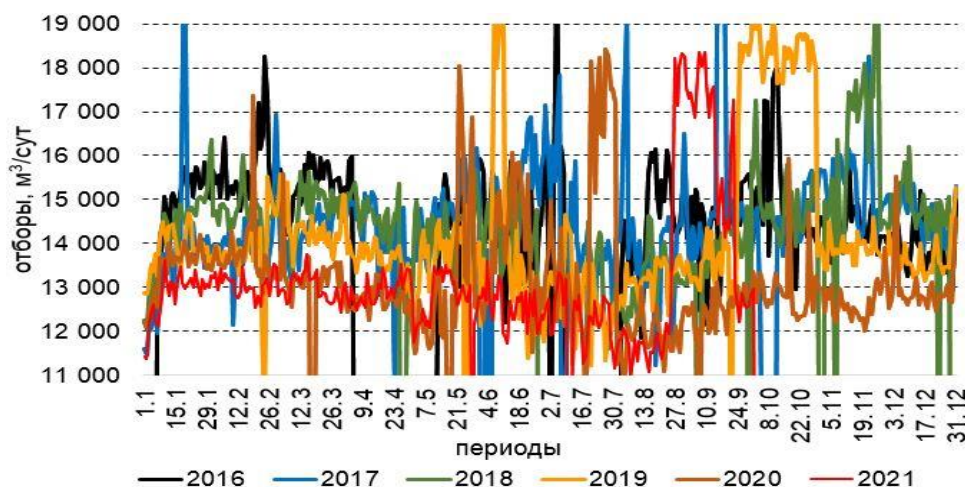


Рис. 5. Распределение отборов воды микрорайоном Иркутск-II (07.01.2016–02.10.2021 гг.)

Fig. 5. Distribution of water withdrawals by the Irkutsk-II microdistrict (07.01.2016–02.10.2021)

Сведения об отборах воды основной территорией ИАЗ за период 03.01.2017–01.10.2021 гг. получены с расходомера, расположенного на данной территории (обозначен на рис. 4 прибором учета № 9). Распределение отборов воды основной территорией ИАЗ представлено на рис. 6.

чен на рис. 4 прибором учета № 9). Распределение отборов воды основной территорией ИАЗ представлено на рис. 6.

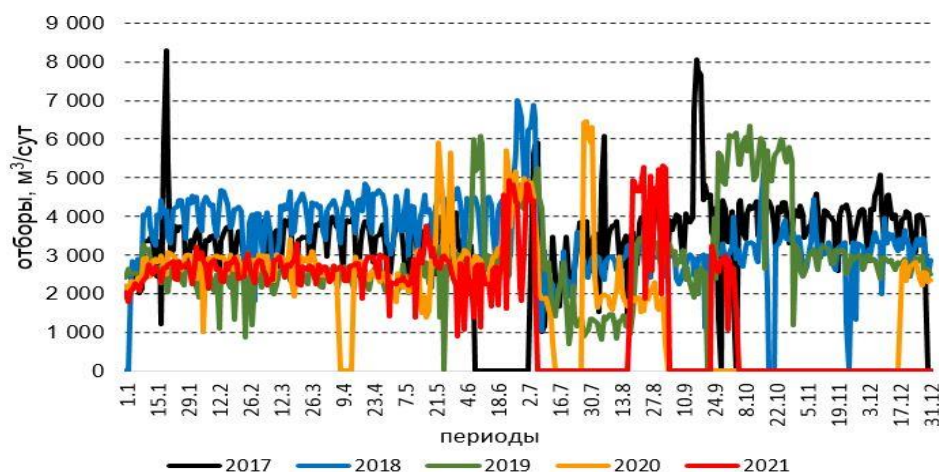


Рис. 6. Распределение отборов воды Иркутским авиационным заводом (территория основная), узел № 43, за период 03.01.2017–01.10.2021 гг.

Fig. 6. Distribution of water withdrawals by the Irkutskiy Aviatsonnyy Zavod (main area), node No. 43, for the period 03.01.2017–01.10.2021

Сведения об отборах воды дополнительной территорией ИАЗ за период 03.01.2017–01.10.2021 гг. получены с расходомеров, расположенных в районе ВП-4 (обозначены на

рис. 4 приборами учета № 3, 4, 5). Распределение отборов воды дополнительной территорией ИАЗ представлено на рис. 7 разницей показаний приборов: № 3 – (№ 4 + № 5).

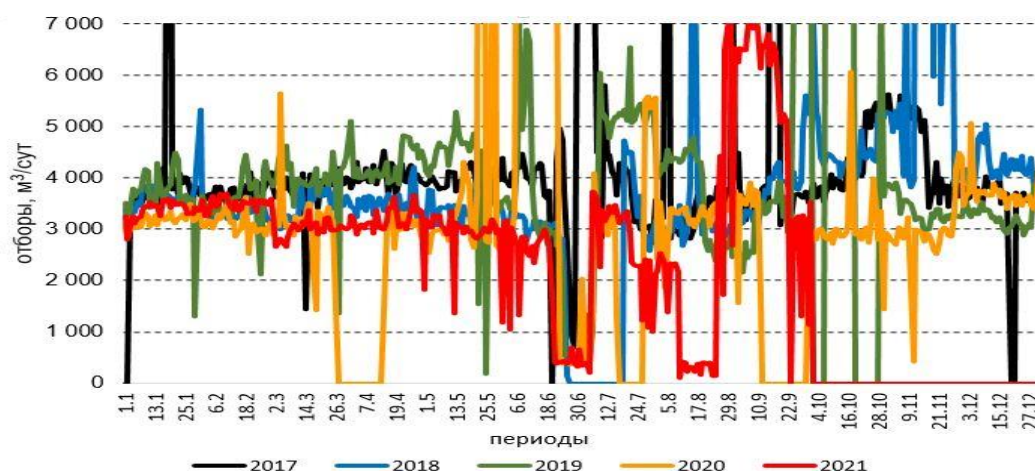


Рис. 7. Распределение отборов воды Иркутским авиационным заводом (дополнительная территория, узел № 2) за период 03.01.2017–01.10.2021 гг.

Fig. 7. Distribution of water withdrawals by the Irkutskiy Aviatsonnyy Zavod (additional area, node No. 2) for the period 03.01.2017–01.10.2021

Сведения об отборах воды населением микрорайона Иркутск-II за период 03.01.2017–01.10.2021 гг. получены по разнице показаний расходомеров: № 1 – № 9 – № 3 + № 4 + № 5, указанных на рис. 4. Распределение отборов воды населением представлено на рис. 8.

На рис. 5–8 видно, что каждый год наблюдается тенденция к снижению отборов воды в микрорайоне Иркутск-II. Указанный факт можно считать результатом эффективной политики сбережения энергоресурсов, установки индивидуальных приборов учета холодной и горячей воды.

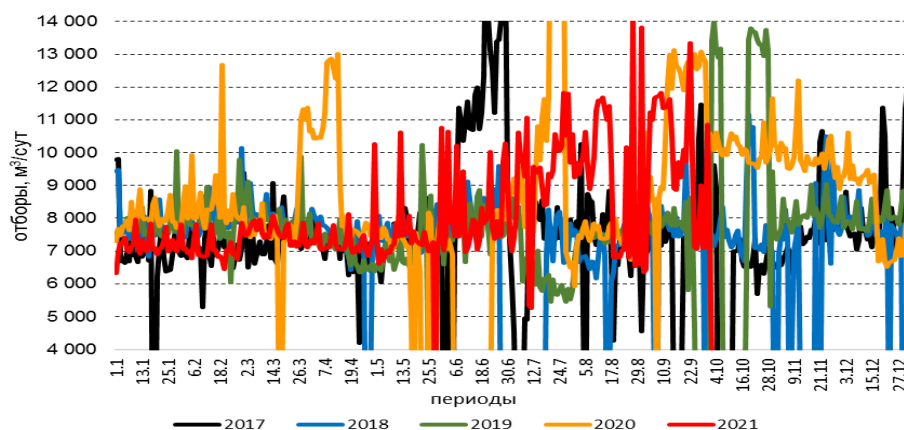


Рис. 8. Распределение отборов воды населением микрорайона Иркутск-II за период 03.01.2017–01.10.2021 гг.

Fig. 8. Distribution of water withdrawals by the population of the Irkutsk-II microdistrict for the period 03.01.2017 - 01.10.2021

Ежегодное снижение водопотребления уменьшает нагрузку на СПРВ, в общем увеличивает качество снабжения потребителей. При этом сезонная неравномерность отборов достаточно высока, снижается надежность функционирования СПРВ, особенно в летний период. Указанные обстоятельства требуют проведения исследования. Узлы № 2 и 49 являются наиболее крупными потребителями воды. Повышенные отборы воды этими узлами связаны не только с отборами на нужды ИАЗ. На основной и дополнительной территориях ИАЗ расположены котельные № 1–3, обеспечивающие горячее водоснабжение и отопление как самого завода, так и жилого массива.

Неравномерное распределение отборов воды в течение года обусловлено следующим:
1. Узлы № 2, 43:

а) в летний период – снижение объемов потребления котельных № 2 и 3 на подпитку систем отопления;

б) в зимний период – увеличение циркулируемых в тепловых сетях объемов теплоноси-

теля вынуждает котельные повышать давление и их перепады на подающих и обратных трубопроводах, как следствие, увеличивается объем утечек в системе;

в) нужды горячего водоснабжения потребителей по сезонам меняются незначительно;

г) в летний период резкие скачки в отборах воды узлами № 2, 43 связаны с попеременными отключениями каждой из котельных при проведении ремонтно-профилактических работ, соответственно, распределением всей нагрузки на котельную, остающуюся в работе.

2. Узлы № 19, 22, 52–58 – изменения потребления воды жителями частного сектора в летний и зимний периоды.

С использованием обработки статистических данных по общим отборам воды и отборам воды наиболее крупных потребителей определены средние нагрузки каждого узла-потребителя расчетной схемы микрорайона Иркутск-II, представленной на рис. 3.

Распределение среднечасовых отборов воды узлами, м³/час, изображено на рис. 9.

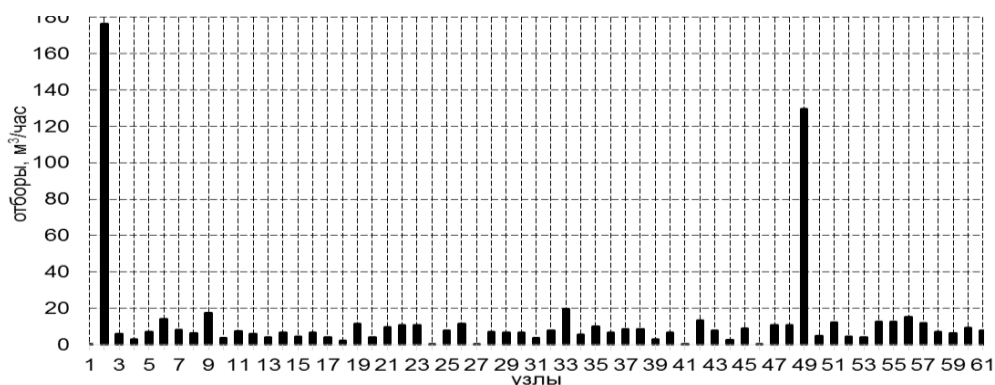


Рис. 9. Распределение среднечасовых отборов воды узлами, м³/час

Fig. 9. Distribution of average hourly water withdrawals by units, m³ / hour

Проведен сбор статистического материала (за период 2006–2017 гг.) по количеству аварий на участках СПРВ микрорайона Иркутск-II, распределение аварий по времени представлено в таблице.

кутск-II, распределение аварий по времени представлено в таблице.

Распределение количества аварий в системе подачи и распределения воды микрорайона Иркутск-II за период 2006–2017 гг.

Distribution of the number of accidents in the water supply and distribution system of the Irkutsk-II microdistrict for the period 2006–2017

Период	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Среднее
Январь	0	0	0	0	3	2	1	1	1	2	0	2	1,0
Февраль	2	5	3	0	6	1	2	4	0	2	1	1	2,3
Март	1	3	5	2	1	0	2	5	2	1	0	3	2,1
Апрель	4	4	6	2	8	6	9	5	6	3	4	3	5,0
Май	6	6	9	2	11	6	6	4	4	1	4	1	5,0
Июнь	0	3	7	6	7	5	3	2	13	2	7	1	4,7
Июль	4	7	7	12	14	4	6	6	8	10	4	6	7,3
Август	9	9	5	6	9	8	7	5	1	6	2	0	5,6
Сентябрь	5	8	11	7	7	5	5	5	3	7	2	0	5,4
Октябрь	9	2	8	7	3	6	4	7	5	6	4	3	5,3
Ноябрь	12	4	3	2	5	1	5	4	5	8	7	4	5,0
Декабрь	2	0	2	2	3	7	3	4	2	3	2	1	2,6
Всего	54	51	66	48	77	51	53	52	50	51	37	25	–

По результатам обработки материала о распределении количества аварий, параметров СПРВ определены интенсивность отказов на участках и интенсивность восстановления участков. Рассчитанные параметры позволили найти вероятности нахождения участков и СПРВ в целом в безаварийном и аварийном состояниях.

Результаты и их обсуждение

По представленной методике и с использованием программы для ЭВМ в данной работе произведен расчет показателей надежности обеспечения потребителей водой по сезонам года (зимний, летний) для каждого узла расчетной схемы микрорайона Иркутск-II. Результаты определения показателей представлены по вариантам:

1. Существующий вариант работы системы (исходный):

– зимний – голубой цвет, отмечен сплошной линией;

– летний – малиновый цвет, отмечен сплошной линией.

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

– зимний – синий цвет, отмечен пунктирной линией;

– летний – красный цвет, отмечен пунктирной линией.

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

– зимний – синий цвет, отмечен сплошной линией;

– летний – красный цвет, отмечен сплошной линией.

Нормируемые показатели надежности $K_i(\text{норм}) = 0,99178$, $P_i(\text{норм}) = 0,99998$ отмечены зеленым цветом.

Обобщенные показатели надежности K_i , P_i , полученные по результатам расчетов по исходному варианту и вариантам с проведением мероприятий, отображены на рис. 10, 11.

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

1. Резкие сезонные изменения в потреблении воды частным сектором: подключение летнего водопровода для обеспечения хозяйственно-питьевых нужд, нужд на полив, значительное удаление объектов частного сектора от вводных линий, питающих всю СПРВ микрорайона Иркутск-II, приводят в летний период к значительному ухудшению качества снабжения водой всех потребителей, как частного сектора, так и многоквартирных домов (узлы № 3–5, 21, 23, 29, 32, 60), участки снабжения которых являются транзитными для частного сектора. Узлы № 4, 10–13, 18–21, 33, 35–37, 40 (3, 4, 5-этажные многоквартирные дома) имеют достаточно высокий требуемый напор, соответственно, риск некачественного снабжения водой.

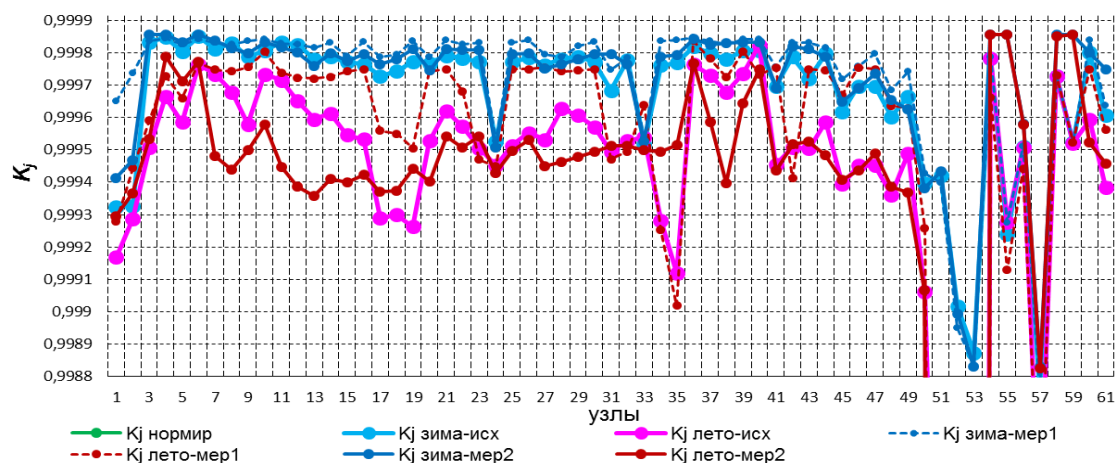


Рис. 10. Распределение показателя надежности K_i в микрорайоне Иркутск-II
Fig. 10. Distribution of the reliability indicator K_i in the Irkutsk-II microdistrict

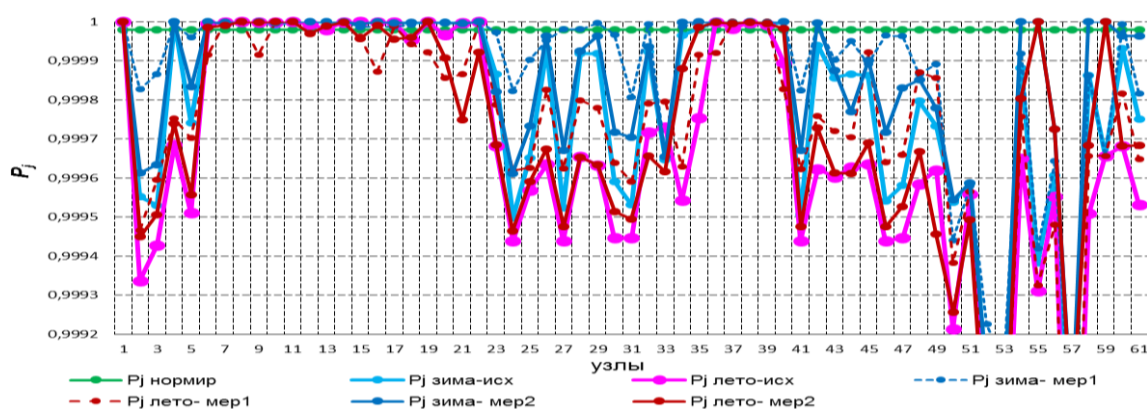


Рис. 11. Распределение показателя надежности P_i в микрорайоне Иркутск-II
Fig. 11. Distribution of the reliability indicator P_i in the Irkutsk-II microdistrict

Указанные узлы в зимний период имеют высокие расчетные значения P_i , в летний период P_i становятся ниже нормируемых (на рис. 12 выделены переходной красной заштрихованной зоной).

В летний период отключение ВП-2 может привести к отказу снабжения узлов № 20, 21, 33, 35, отключение ВП-4 – к отказу снабжения узлов № 3, 4, 10–13, 18, 19, 36, 37, 40.

2. Отсутствие резервных линий приводит к понижению значений показателя P_i и указывает на повышенный риск необеспечения потребителей как в зимний, так и летний периоды. Это касается в первую очередь потребителей, подключенных от тупиковых участков (узлы № 51–59 – частный сектор; узлы № 48, 50, 61 – многоквартирные дома, узел № 49 – основная территория ИАЗ). Такие потребители на рис. 12 выделены синим цветом.

3. Повышенную надежность обеспечения имеют узлы № 6–9, 14–17, 38 (на рис. 12 отмечены зеленым цветом), которые расположены на границе зон влияния насосных стан-

ций 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. Потребители в СПРВ расположены вблизи от ВП-2 и ВП-4, сезонные колебания отборов незначительно сказываются на качестве их снабжения.

4. Невысокое качество снабжения потребителей, подключенных от кольцевых участков (узлы № 23, 24, 27, 28, 26, 46, 47, 44, 42, 43, 41, 39, 10, 13, 18, 60), обусловлено малой пропускной способностью данных участков ($D_{25-9} = 150$ мм, $D_{9-8} = 150$ мм). Отключение ВП-2 или ВП-4 может привести к негативным последствиям в снабжении этих потребителей. На рис. 12 такие потребители выделены оранжевым цветом. По итогам исследования можно выделить своеобразные зоны надежности водоснабжения потребителей.

В зависимости от удаленности объектов от вводных линий, питающих СПРВ Иркутска-II, пропускной способности линий, питающих по-

требителей, наличия (отсутствия) резервных линий, питающих потребителей в случае аварий, требований самих потребителей, на рис. 12 представлены 4 зоны:

- зона высоконадежного снабжения потребителей, выделенная зеленым цветом (в зимний и летний период показатели P_i стабильно выше нормируемых значений);
- зона умереннонадежного снабжения потребителей, отмеченная желтым цветом (в зимний и летний период показатели P_i в пределах нормируемых значений – чуть выше, чуть ниже);
- зоны низконадежного снабжения потребителей, выделенные голубым цветом (в зимний и летний период показатели P_i стабильно ниже нормируемых значений);

– красной заштрихованной зоной (переходной) обозначены потребители, имеющие высокую надежность обеспечения в зимний период и ниже нормируемой в летний период.

Подобная оценка надежности работы сети может проводиться регулярно. Изменение объемов потребления и количества аварий по сезонам будет приводить к разному обеспечению водой потребителей. Наряду с исследованием работы существующего варианта системы водоснабжения проведен анализ изменения качества снабжения потребителей после выполнения мероприятий. Схема водопроводных сетей (в узловой форме) с учетом проведенных мероприятий представлена на рис. 13.



Рис. 12. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II (зоны надежности снабжения потребителей водой)

Fig. 12. Scheme of water supply networks of the Irkutsk-II microdistrict (zones of reliable water supply to consumers)

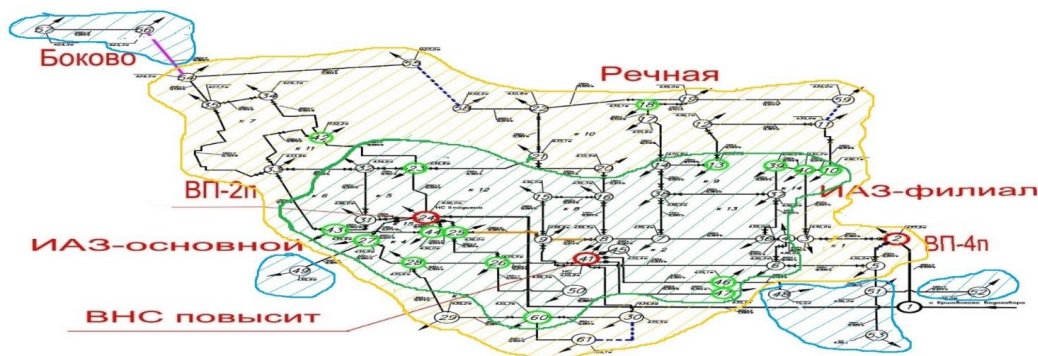


Рис. 13. Схема водопроводных сетей микрорайона Иркутск-II (с проведенными мероприятиями)

Fig. 13. Scheme of water supply networks of the Irkutsk-II microdistrict (with the measures taken)

Мероприятие 1: увеличение пропускной способности участков трубопровода 25-9, 9-8; увеличение диаметра участков со 150 мм до 250 мм. На рис. 13 указанные участки выделены оранжевым цветом.

Результаты вычислений по сезонам года представлены на рис. 10, 11: K_i зима-мер1, P_i зима-мер1 – выделены синим пунктиром,

K_i лето-мер1, P_i лето-мер1 – красным пунктиром.

Расчетные показатели надежности P_i не для всех потребителей в полной мере достигают нормируемых значений. От выполнения мероприятия и в летний, и в зимний периоды наблюдается улучшение качества снабжения основной массы потребителей (узлы № 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. Указанные мероприятия по отношению к мероприятию 1 имеют более узкую направленность, предназначены для улучшения качества снабжения водой небольших групп потребителей. На рис. 13 указанные участки выделены синими пунктирными линиями.

Результаты вычислений по сезонам года представлены на рис. 10, 11: K_i зима-мер2, P_i зима-мер2 – выделены синим цветом, K_i лето-мер2, P_i лето-мер2 – красным цветом.

По итогам выполнения мероприятий 1 и 2 на рис. 13 можно наблюдать расширение зон надежного водоснабжения потребителей.

Заключение

В результате проведенного исследования:

1. Определена оценка эксплуатационной надежности СПРВ в летний и зимний периоды ее эксплуатации.

2. Исследовано влияние количественного распределения аварий в СПРВ и изменений водопотребления на качество снабжения потребителей водой.

3. Определены по сезонам года экономические и социальные эффекты от применения предлагаемой методики и выполнения мероприятий по улучшению качества функционирования СПРВ.

Анализ сезонных изменений отборов воды потребителями, структурных изменений в СПРВ позволяют сформировать математические модели функционирования СПРВ в каждом исследуемом периоде времени эксплуатации системы. Методика вероятностного моделирования работы СПРВ с учетом этих факторов адекватно описывает реальные процессы, происходящие в ней, что обеспечивает качественно новый уровень эксплуатации систем водоснабжения. Разработанная методика и программа ЭВМ позволяют моделировать различные режимы эксплуатации СПРВ и оценивать их режимную управляемость, готовность к изменяющимся во времени условиям работы. Она является хорошим инструментом для эксплуатирующих организаций в поиске оптимальных условий функционирования СПРВ в любой произвольный момент времени года. На примере системы подачи и распределения воды микрорайона Иркутск-II показана эффективность предлагаемой методики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Muniyappa N. C. Improving the performance of Public Water Utilities - A case study of Bangalore / BWSSB Presentation. 14 p. URL: https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/workshop_asia/presentations/muniyappa.pdf (11.09.2021).
2. Development plan for water supply and sewerage infrastructure / Experts Group for Water Supply and Sewerage (GEUK). Peja, 2008. 49 p.
3. Holas J. Development Plan of Water Supply and Sewerage in the Hradec Kralove Region // PROJECTS, the BEST. 2006. p. 38-40.
4. Kloss H., Roman M. Ogólne problemy niezawodności systemów wodociągowych i kanalizacyjnych // Gaz Woda Techn Sanit. 1974. Vol. 48. p. 302-304.
5. Ильин Ю. А. Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987. 320 с.
6. Гальперин Е. М. Надежностные расчеты кольцевых водопроводных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 3. С. 26–29.
7. 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.
8. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения. М.: Стройиздат, 1979. 232 с.
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 построение аналитических расчетных графиков // Сб. научных трудов. Вып. I. М.: ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1975. С. 28–34.
11. Карамбиров С. Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. М.: МГУП, 2004. 197 с.
12. Чупин Р. В., Душин А. С. Оценка надежности обеспечения потребителей водой // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 3. С. 26–29.

снабжение 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. 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. С. 790–803. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-790-803>.

15. Сеннова Е. В., Кирюхин С. Н. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов [Электронный ресурс] / ОАО «Газпром промгаз». Москва, 2013. URL: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/metod_1590.pdf (12.08.2021).

16. Дерюшева Н. Л., Дерюшев Л. Г. О нормировании надежности и производительности сооружений систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 11. С. 48–51.

17. Найманов А. Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети //

Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 12. С. 11–16.

18. Чупин В. Р., Мелехов Е. С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2011. 323 с.

19. 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.

20. 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. № 1 (31). С. 112–125. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-112-125>.

21. Чупин В. Р., Душин А. С. Оценка надежности систем подачи и распределения воды // Яковлевские чтения: сборник докладов XVI Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева (г. Москва, 15 марта 2021 г.). Москва: МИСИ – МГСУ, 2021. С. 254–264.

22. Hartley S., Harriss R. C., Blanchard T. Urban water demand and climat change // Nature Resource Forum. 1994. Vol. 1. p. 62. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1994.tb00872.x>.

REFERENCES

1. Muniyappa N.C. Improving the performance of Public Water Utilities - A case study of Bangalore. 14 p. Available from: https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/workshop_asia/presentations/muniyappa.pdf [Accessed 11 September 2021].

2. Development plan for water supply and sewerage infrastructure. Peja, 2008. 49 p.

3. Holas J. Development Plan of Water Supply and Sewerage in the Hradec Kralove Region. *PROJECTS, the BEST*. 2006. p. 38-40.

4. Kloss H., Roman M. Ogólne problemy niezawodności systemów wodociagowych i kanalizacyjnych. *Gaz Woda Techn Sanit*. 1974;48:302-304.

5. Il'in YuA. Calculation of the reliability of water supply. Moscow: Stroiizdat; 1987. 320 p. (In Russ.).

6. Galperin EM. Reliability calculations for ring water supply systems. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2003;3:26-29. (In Russ.).

7. Stupina LA, Chupin VR. The problem of regulating the reliability of water supply to consumers in

the design problems of water transport systems. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. Kiev: UMK VO; 1989. p. 171-174. (In Russ.).

8. Abramov NN. Reliability of water supply systems. Moscow: Stroiizdat; 1979. 232 p. (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 analytical calculation graphs. *Sb. nauchnykh trudov*. Vol. 1. Moscow: ONTI TsNIIEP inzhenernogo oborudovaniya; 1975. p. 28-34. (In Russ.).

11. Karambirov SN. Mathematical modeling of water supply and distribution systems under multi-mode and uncertainty conditions: 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;12:35-42. (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. 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, 2013. Available from: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/metod_1590.pdf [Accessed 12 August 2021]. (In Russ.).
16. 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.).
17. Naimanov AY. Features of reliability evaluation of ring water supply system. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2006;12:11-16. (In Russ.).
18. Chupin RV, Melekhov ES. Development of theory and practice of modeling and optimization of water supply and sanitation systems. Irkutsk: ISTU; 2011. 323 p. (In Russ.).
19. 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.).
20. 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>.
21. Chupin VR, Dushin AS. Assessment of the reliability of water supply and distribution systems. *Yakovlevskie chteniya: sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva* (Moscow, 15th March 2021). Moscow: MISI – MGSU, 2021. p. 254-264. (In Russ.).
22. Hartley S, Harriss RC, Blanchard T. Urban water demand and climate change. *Nature Resource Forum*. 1994;1:62. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1994.tb00872.x>.

Информация об авторе

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

Information about the author

Aleksei S. Dushin,
civil engineer,
ООО «Network company «IRKUT»»,
28A Aviastroiteley St., Irkutsk 664020, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-5167>

Вклад автора

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

Contribution of the author

Dushin A. S. has conducted the study, prepared the manuscript 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 30.09.2021.
Одобрена после рецензирования 28.10.2021.
Принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 30.09.2021.
Approved after reviewing 28.10.2021.
Accepted for publication 01.11.2021.