

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО-РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРОСЬЮМЕРАМИ

**И.В. Постников**, [postnikov@isem.irk.ru](mailto:postnikov@isem.irk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6583-1142>  
**Е.Е. Медникова**, [yakimetse@isem.irk.ru](mailto:yakimetse@isem.irk.ru)

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия*

**Аннотация.** На современном этапе развития систем теплоснабжения они трансформируются в системы централизованно-распределенного типа, интегрирующие различные энергетические технологии для достижения максимальной эффективности и надежности теплоснабжения потребителей при оптимальном сочетании централизованной и распределенной генерации тепловой энергии. Сектор распределенной генерации в этих системах связан прежде всего с реализацией технологий активного потребителя или просьюмера (от англ. prosumer). При этом наряду с аспектами эффективного управления рассматриваемых систем с участием просьюмеров одной из актуальных задач становится обеспечение надежности их функционирования. Основная задача исследования заключается в оптимизации параметрической надежности системы централизованно-распределенного теплоснабжения с учетом использования резервных функций просьюмеров, обеспечиваемых их собственной генерацией или аккумулярованием тепловой энергии. Методология решения основана на применении положений теории надежности, узлового подхода к анализу надежности теплоснабжения, моделей марковского случайного процесса, некоторых упрощенных закономерностей теплопередачи в процессах потребления тепловой энергии и некоторых других методов и моделей. Предложенные методы и модели обобщены в рамках единой методологической схемы, состоящей из основных этапов анализа и оптимизации (синтеза) надежности. Проведен вычислительный эксперимент на основе тестовой схемы системы теплоснабжения, представлен анализ полученных результатов, сформулированы выводы и направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** система централизованного теплоснабжения, надежность, просьюмер, математическое моделирование, параметры надежности элементов, марковский случайный процесс, эффект тепловой инерции

**Благодарности:** Исследование выполнено в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) при поддержке гранта РФФИ № 22-29-01252, <https://rscf.ru/project/22-29-01252/>.

**Для цитирования:** Постников И.В., Медникова Е.Е. Методы определения оптимальных параметров надежности систем централизованно-распределенного теплоснабжения с просьюмерами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 104–115. DOI: 10.14529/power220210

Original article  
DOI: 10.14529/power220210

## METHODS AND MODELS FOR DEFINING OPTIMAL RELIABILITY PARAMETERS IN DISTRICT-DISTRIBUTED HEATING SYSTEMS

**I.V. Postnikov**, [postnikov@isem.irk.ru](mailto:postnikov@isem.irk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6583-1142>  
**E.E. Mednikova**, [yakimetse@isem.irk.ru](mailto:yakimetse@isem.irk.ru)

*Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** District-distributed heating systems are considered to be the result of the development of existing district heating systems. In such the various energy technologies are integrated in order to achieve maximum efficiency of the heating for consumers. The distributed sector in these systems is associated, first of all, with the implementation of prosumers. The objective of the study is to define parameters for the reliability of components in the system which provide the required level of reliability of heating to consumers at the minimum cost. This is while ensuring the level of reliability while taking into account the reserve functions of prosumers. A methodology aimed at solving the objective thus stated was developed using various methods and models. These included: certain laws of reliability theory, nodal approach to the reliability analysis, models of the Markov random process, laws of thermophysical processes, heat load curve, etc. The proposed methods and models are presented within a comprehensive methodological schematic which includes the main stages of analysis and optimization (synthesis) of reliability. The methodological and computational

tools thus developed were used to conduct a computational experiment for a test diagram of a heating system. The results obtained were analyzed, and their graphical interpretations presented. The conclusions and directions for further research were formulated.

**Keywords:** district heating system, reliability, prosumer, mathematical modeling, reliability parameters of components, markov random process, thermal inertia

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01252, <https://rscf.ru/project/22-29-01252/>.

**For citation:** Postnikov I.V., Mednikova E.E. Methods and models for defining optimal reliability parameters in district-distributed heating systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):104–115. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220210

## Введение

### Актуальность

Развитие современной теплоэнергетики осуществляется по двум взаимосвязанным направлениям: с одной стороны, технологической модернизации, а с другой – структурной трансформации систем централизованного теплоснабжения (СЦТ). Согласно исследованиям Н. Lund и А. Revesz с соавторами [1–3], развитие этих систем до настоящего времени включает 4 периода, начиная с систем 1-го поколения до систем 4-го поколения, а в перспективе рассматривается переход к системам 5-го поколения. В указанных работах подробно рассматриваются особенности этих систем. Для современных СЦТ 4-го поколения (4G DH systems) характерна интеграция различных энергетических технологий с целью повышения энергетической эффективности на всех этапах производства и распределения тепловой энергии [4–6]. В обзорном исследовании [7] рассматриваются различные аспекты функционирования СЦТ 4-го поколения при переходе на низкотемпературные графики теплоснабжения. Широкое применение доступных энергоресурсов, в том числе возобновляемых, на различных типах источников тепловой энергии (ИТ) приводит к расширению распределенного сектора теплоснабжения, в рамках которого реализуется технология активного потребителя или *просьюмера* (от англ. prosumer), обладающего собственными резервами и генерацией. В результате такого преобразования формируются системы централизованно-распределенного теплоснабжения (СЦРТ), объединяющие централизованные и локальные ИТ просьюмеров. В процессе развития этих систем приобретаются новые свойства и особенности их функционирования, обусловленные новой структурой, параметрами, принципами и подходами к управлению и обеспечению надежности. Для получения оптимальных решений в этой области требуется корректировка существующего или разработка нового научно-методического обеспечения.

### Краткий обзор исследований

Методология оптимального управления СЦРТ с учетом надежности предполагает постановку и решение целого комплекса научно-методических и инженерных задач: определение оптимальной структуры и параметров этих систем, определение

эффективного соотношения централизованной и распределенной тепловой мощности и нагрузки, оптимальная загрузка централизованных и распределенных источников при эксплуатации, анализ и обеспечение надежного функционирования системы с учетом новых объектов и т. д. Некоторые методические исследования по внедрению просьюмеров в системы теплоснабжения рассмотрены в работах [8–18]. Так, например, оригинальный метод оптимального управления функционированием системы теплоснабжения с просьюмерами предложены А. Пеньковским и соавторами [14, 15]. Предлагаемый методический подход, основанный на двухуровневом программировании, позволяет определять оптимальную загрузку централизованных и распределенных ИТ просьюмеров, функционирующих в рамках единой системы. L. Brand (Brange) и соавторы в работах [16, 17] рассматривают технологии подключения просьюмеров к действующим СЦТ и предлагают методологию оценки эффективности таких систем для условий Швеции. Исследования ученых из Норвегии, Н. Кауко и соавторов [18], посвящены разработке динамической модели локальной распределенной системы теплоснабжения с просьюмерами и ее приложению. В рассмотренных выше работах показано, что собственная генерация просьюмера позволяет снизить нагрузку на централизованные ИТ и тепловые сети (ТС) за счет покрытия части собственной нагрузки (главным образом, пиковой), а также обеспечивает дополнительный резерв по мощности и времени в локальных зонах своего действия.

### Обоснование научной новизны

Научно-методические наработки по различным аспектам функционирования систем теплоснабжения различного масштаба и структуры с учетом внедрения просьюмеров и их преобразования в настоящее время постоянно пополняются новыми результатами, что требует периодической актуализации обзора и анализа исследований в этой области. Тем не менее на основе проведенного обзора (более обширного, чем приведенного здесь ввиду публикационного регламента) можно сделать вывод, что на данный момент достаточно хорошо проработаны вопросы оценки эффективности и оптимального управления СЦРТ с просью-

юмерами. При этом проблемы надежности функционирования этих систем почти не рассматриваются, за исключением некоторых немногих исследований, в том числе при участии авторов настоящей работы. Так, в статье [19] была рассмотрена задача определения оптимального временного резерва просьюмера с учетом свойств восстанавливаемости системы, в которой он функционирует. В другой работе [20] предложены методы обеспечения надежности теплоснабжения просьюмера (в оригинальном исследовании используется термин «активный потребитель») с возможностью использования его активной тепловой мощности. Указанные исследования направлены на решение некоторых частных задач в рамках более общей проблемы обеспечения надежности функционирования развивающихся СЦРТ с применением новых технологических решений, в том числе просьюмеров.

Настоящее исследование является развитием предыдущих работ авторов по данной тематике. Новые аспекты исследования связаны главным образом в более детализированном учете некоторых важных факторов, таких как эффект тепловой инерции в аварийных режимах теплоснабжения потребителей, сезонная динамика изменения тепловых нагрузок и некоторых других. Новизна исследования заключается также в комплексном подходе, объединяющем в единой методике модели вероятностного и физического моделирования исследуемых систем с учетом указанных выше факторов. Предложенные методы и модели интегрированы в виде общей методологической схемы, алгоритмически увязывающей основные задачи анализа и синтеза надежности. Приведены результаты вычислительного эксперимента, проведенного на тестовой схеме СЦРТ, сформулированы выводы и направления дальнейших исследований.

## 1. Методология

### 1.1. Постановка задачи

Постановка задачи заключается в определении таких значений *параметров надежности* элементов СЦРТ, которые обеспечивают *требуемый уровень надежности* теплоснабжения при *минимальных затратах* на обеспечение этого уровня надежности, в пределах заданных технических ограничений. При этом важной компонентой решения этой задачи является учет активного резерва просьюмера, обеспечиваемого мощностью собственного источника. Параметрами надежности являются интенсивности отказов и восстановлений элементов системы, обозначаемые как  $\lambda_n$  (1/ч) и  $\mu_n$  (1/ч) соответственно ( $n$  – номер элемента). Надежность теплоснабжения потребителей может определяться различными узловыми (т. е. определенными относительно каждого потребителя) показателями надежности. В данном исследовании мы используем *вероятность безотказной работы* (ВБР) как один из наиболее информативных и

нормируемых показателей [21]. Этот узловой показатель, обозначаемый как  $R_j$ , представляет собой вероятность того, что для некоторого рассматриваемого потребителя  $j$  требуемый уровень надежности не будет нарушен в соответствии с заданным критерием надежности в течение расчетного периода [21]. Критерием надежности является минимально допустимая температура внутреннего воздуха у потребителя (далее – внутренняя температура), обозначаемая как  $t_{j\min}$  (°C).

### 1.2. Определение общесистемного параметра надежности

Традиционный подход к оптимизации надежности систем теплоснабжения, как и многих других энергосистем, заключается в том, чтобы определить ее параметры и структуру в соответствии с принятым критерием оптимизации и ограничениями на минимальный уровень показателей надежности. Мы предлагаем принципиально другой методический подход, согласно которому требуемое значение показателя надежности назначается не как ограничение области решений, а в качестве исходной постоянной компоненты математической модели, с помощью которой определяются искомые параметры надежности элементов системы. Предлагаемый подход основан на использовании *общесистемного параметра надежности*, т. е. интенсивности отказов или восстановлений. Значение этого параметра изначально принимается одинаковым для всех рассматриваемых элементов системы и таким, при котором обеспечивается заданный уровень надежности, определяемый узловым показателем ВБР (в общем случае, любым другим показателем). В данном исследовании решение поставленной задачи рассматривается относительно *общесистемной интенсивности отказов* элементов, которую обозначим как  $\Lambda_j$  (1/ч).

Далее для получения необходимых нам зависимостей между показателем надежности и параметрами надежности элементов используем следующую формулу для определения узловой ВБР [21]:

$$R_j = \exp\left(-p_0 \sum_{n \in E_n} \lambda_n T_{jn}\right), \quad (1)$$

где  $E_n$  – множество элементов системы;  $p_0$  – вероятность полностью работоспособного состояния исследуемой системы (состояние системы, в котором все ее элементы работоспособны);  $T_{jn}$  (ч) – временной период, в рамках которого отказ элемента  $n$  приводит к отказу теплоснабжения потребителя  $j$ .

Условие отказа теплоснабжения потребителя  $j$ , согласно упомянутому в п. 1.1 критерию, соответствует следующему неравенству:

$$t_{jn} < t_{j\min}, \quad (2)$$

где  $t_{jn}$  (°C) – внутренняя температура потребителя  $j$  при отказе элемента  $n$ . Нормативная величина  $t_{j\min}$  задается в зависимости от категории потребителя по требованиям к качеству используемой тепловой энергии [21].

Идентификация выполнения условия (2) осуществляется на основе многовариантных расчетов аварийных режимов системы, соответствующих отказу того или иного элемента. Более подробно данная процедура описана в п. 1.3. Вероятность  $p_0$ , как и вероятности других состояний, соответствующих отказам ее элементов, могут определяться различными методами в зависимости от выбранной модели эволюции состояний системы. В настоящем исследовании применяется марковский случайный процесс, который рассматривается в п. 1.4. Метод определения показателя  $T_{jn}$  рассматривается в п. 1.5.

Если в формуле (2) использовать вместо  $\lambda_n$ , задаваемую для каждого элемента, общесистемную интенсивность отказов  $\Lambda_j$ , определяемую относительно потребителя  $j$ , то получим

$$R_j = \exp\left(-p_0 \Lambda_j \sum_{n \in E_n} T_{jn}\right). \quad (3)$$

Используя требуемое для потребителя  $j$  значение ВБР, обозначенное как  $R_{j(\text{req})}$ , из выражения (3) получим следующее уравнение для определения такого значения общесистемной интенсивности отказов, при котором обеспечивается заданная надежность теплоснабжения потребителя:

$$\Lambda_{j(R)} = \left(p_0 \sum_{n \in E_n} T_{jn}\right)^{-1} \ln\left(\frac{1}{R_{j(\text{req})}}\right). \quad (4)$$

Индекс  $R$  при показателе  $\Lambda_{j(R)}$  означает, что он определяется относительно требуемого значения ВБР. В общем случае подобная зависимость может быть получена для другого показателя надежности, для чего необходимо использовать соответствующие расчетные зависимости. При этом могут потребоваться дополнительные математические процедуры, чтобы установить взаимосвязь используемого показателя и параметра надежности, поскольку не для каждого из них такая зависимость определена в явном виде.

### 1.3. Физическое моделирование аварийных режимов

Моделирование режимов СЦРТ, как нормальных, так и аварийных, заключается в определении потокораспределения в ТС. Под аварийным понимается такой режим, который устанавливается в сети после отключения отказавшего элемента [21, 22]. Моделируемая ТС представляется в виде расчетной схемы с упорядоченными множествами

ветвей (участков) и узлов, часть из которых являются потребителями, т. е. имеют отбор тепловой энергии. Узловая модель потокораспределения в ТС с учетом теплогидравлического режима определяется следующей системой уравнений, записанных в матричной форме [23]:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{wq}; \quad (5)$$

$$\mathbf{SXx} = \mathbf{h}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица инцидентий линейно независимых узлов и участков сети;  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  – вектор расходов теплоносителя на участках сети  $x_i$  (т/ч);  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_j)$  – вектор расходов тепловой энергии в узлах сети  $q_j$  (кДж/ч);  $\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_n)$  – вектор потерь напора на участках  $h_n$  (м в. ст.);  $\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, \dots, s_n)$  – диагональная матрица гидравлических сопротивлений участков  $s_n$  (м·ч<sup>2</sup>/т<sup>2</sup>);  $\mathbf{X} = \text{diag}(x_1, \dots, x_n)$  – диагональная матрица расходов теплоносителя на участках;  $w = (c_w \Delta t)^{-1}$  – коэффициент перехода от массового потока теплоносителя к потокам тепловой энергии;  $c_w$  (кДж/(т·°C)) – теплоемкость теплоносителя;  $\Delta t$  (°C) – разность температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе.

Расчет потокораспределения и соответствующих тепловых потоков в аварийном режиме, т. е. при выходе из строя какого-либо участка сети  $n$ , проводится при условии отсутствия расхода через этот участок, т. е. при  $x_n = 0$ . В результате многовариантных расчетов по каждому элементу получаем матрицу массовых расходов или подачи тепловой энергии потребителям для каждого рассматриваемого аварийного режима (здесь при отказе какого-либо элемента), т. е. значения  $g_{jn}$  (т/ч) и  $q_{jn}$  (кДж/ч) соответственно.

### 1.4. Вероятностное моделирование аварийных режимов

Вероятности состояний системы определяются на основе модели марковского случайного процесса, описывающего эволюцию событий. Обоснования применения данной модели для решения задач надежности теплоснабжения рассматриваются в [21, 24]. Существуют различные формализации и виды марковских моделей. Используем следующую систему уравнений, описывающих стационарный марковский случайный процесс для условий простейшего потока событий [24]:

$$p_i = \left(\sum_{n \in E_i} (\lambda_n + \mu_n)\right)^{-1} \left(\sum_{k \in S_i} p_k \sum_{n \in E_k} (\lambda_n + \mu_n)\right), i \in S, \quad (7)$$

где  $i$  и  $k$  – номера состояний системы;  $S$  – множество состояний;  $p_i$  и  $p_k$  – вероятности состояний;  $E_i$  – подмножество элементов системы, отказ или восстановление которых соответствует пря-

тому (без промежуточных состояний) переходу из состояния  $i$  в состояние  $k$ ;  $E_k$  – подмножество элементов, отказ или восстановление которых соответствует непосредственному переходу из состояния  $k$  в некоторое состояние  $i$ ;  $S_i$  – подмножество состояний, из которых возможен прямой переход в состояние  $i$ .

Уравнение (7) представлено в общей формулировке при условии, что количество аварийных состояний может не соответствовать количеству единичных отказов. Иначе говоря, такое условие допускает сложные состояния, соответствующие одновременному отказу нескольких элементов, при этом множество состояний  $S$  поглощает как число элементов, так и группу сложных состояний. Если множество состояний ограничивается только единичными отказами, то любая вероятность  $p_i$  представляет собой вероятность отказа некоторого элемента  $n$  –  $p_n$ , а модель (7) значительно упрощается:

$$p_n = p_0 \lambda_n / \mu_n, n \in E_n; \quad (8)$$

$$p_0 = \left( 1 + \sum_{n \in E_n} \frac{\lambda_n}{\mu_n} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Допущение о возможности состояний только с одним отказавшим элементом вполне достоверно соответствует действующим ТС, что подтверждается статистическими данными по их аварийности [21]. Однако при совместном анализе надежности схем ИТ и ТС вероятность сложных состояний повышается, как и при переходе исследуемых систем теплоснабжения к централизованно-распределенному типу, вследствие появления новых объектов.

### 1.5. Моделирование процессов тепловой инерции с учетом изменения тепловой нагрузки

Одной из функциональных особенностей систем теплоснабжения, оказывающих значительное влияние на свойства их надежности в аварийных состояниях, является теплоаккумулирующий эффект потребителей, связанный с процессом тепловой инерции. С точки зрения надежности тепловая инерция обеспечивает пассивный временной резерв (избыточность). Величина этого резерва определяется теплофизическими свойствами и характеризуется соответствующим коэффициентом тепловой инерции [25]:

$$\varepsilon_j = (Fbv\rho/\gamma)_j, \quad (10)$$

где  $F$  ( $\text{м}^2$ ) – площадь наружной стены здания;  $b$  (м) – толщина стены;  $v$  ( $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ) – теплоемкость материала стены;  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) – плотность материала стены;  $\gamma$  ( $\text{кДж}/^\circ\text{C}$ ) – удельные тепловые потери.

Для учета эффекта тепловой инерции в задаче надежности воспользуемся следующим выражением

для определения температуры наружного воздуха  $t_{jn}$  ( $^\circ\text{C}$ ), при которой временная избыточность равна времени восстановления расчетного теплоснабжения потребителя  $j$  после отказа элемента  $n$  [21]:

$$t_{jn} = \left[ 1 - \left( \frac{q_{jn}}{q_{j0}} \right) \left( 1 - \exp \left( \frac{1}{\varepsilon_j \mu_n} \right) \right) \right]^{-1} \times \left[ t_{j0} \left( 1 - \left( \frac{q_{jn}}{q_{j0}} \right) \right) - \left( t_{j\min} - t_{j0} \right) \left( \frac{q_{jn}}{q_{j0}} \right) \exp \left( \frac{1}{\varepsilon_j \mu_n} \right) \right], \quad (11)$$

где  $q_{jn}$  ( $\text{кДж}/\text{ч}$ ) – уровень подачи тепла потребителю при отказе элемента  $n$ ;  $q_{j0}$  ( $\text{кДж}/\text{ч}$ ) – расчетная тепловая нагрузка потребителя;  $t_{j0}$  ( $^\circ\text{C}$ ) – расчетная внутренняя температура у потребителя.

Физический смысл показателя  $t_{jn}$  состоит в том, что при более низкой внешней температуре в состоянии отказа элемента  $n$  временного резерва недостаточно для поддержания внутренней температуры выше допустимого уровня, т. е. происходит отказ теплоснабжения по условию (2). Введенный в п. 1.2 показатель  $T_{jn}$  определяется по значению  $t_{jn}$  из графика Россандера [25], который хорошо описывается соответствующим уравнением, приведенным в [22]. Используем это уравнение для установления связи между уровнем аварийного теплоснабжения  $q_{jn}$  и периодом  $T_{jn}$ , в течение которого отказ элемента  $n$  приводит к отказу теплоснабжения по условию (2).

В такой интерпретации уравнение Россандера [22] может быть представлено следующими выражениями:

$$q_{jn} = q_{j0} \left[ 1 - (1 - \omega_j) \left( \frac{T_{jn}}{T_{j0}} \right)^{(1/\alpha_j)} \right]; \quad (12)$$

$$\omega_j = q_{jb} / q_{j0}; \delta_j = q_{jav} / q_{j0}; \quad (13)$$

$$\alpha_j = (1 - \delta_j) / (\delta_j - \omega_j), \quad (14)$$

где  $T_{j0}$  (ч) – расчетный период времени;  $\alpha_j, \omega_j, \delta_j$  – коэффициенты неравномерности графика тепловой нагрузки;  $q_{jav}$  и  $q_{jb}$  ( $\text{кДж}/\text{ч}$ ) – тепловые нагрузки: средняя за расчетный период и соответствующая его началу.

Далее выразим показатель  $T_{jn}$  из формулы (12):

$$T_{jn} = T_{j0} \left[ \frac{1 - (q_{jn} / q_{j0})}{(1 - \omega_j)} \right]^{\alpha_j}. \quad (15)$$

Подставив формулу (15) в выражение (4), получим следующую зависимость для определения общесистемной интенсивности отказов при выполнении требуемого уровня надежности по ВБР:

$$\Lambda_{j(R)} = \left[ p_0 T_{j0} \sum_{n \in E_n} [(q_{jn} / q_{j0}) / (1 - \omega_j)]^{\alpha_j} \right]^{-1} \times \ln \left( \frac{1}{R_{j(\text{req})}} \right). \quad (16)$$

Выражение (16) является базовой компонентой разработанной методики оптимизации надежности СЦРТ и устанавливает связь между параметрами надежности элементов системы (в данном случае по общесистемной интенсивности отказов) и требуемым уровнем надежности системы (по ВБР), с учетом изменения тепловой нагрузки и временной избыточности тепловой инерции.

### 1.6. Моделирование (упрощенное) резервных функций просьюмера

Резервные функции просьюмера в СЦРТ обеспечиваются как пассивными, так и активными средствами. Пассивный резерв обеспечивается главным образом аккумуляторами тепловой энергии для оптимального регулирования теплопотребления, сглаживания пиковых нагрузок и дополнительного теплоаккумулирующего эффекта при отказах централизованного теплоснабжения. Таким образом, для учета пассивного резерва просьюмера в выражение (10) необходимо добавить соответствующую компоненту, которую обозначим как  $\Delta \varepsilon_{j(\text{pro})}$  (ч):

$$\varepsilon_{j(\text{pro})} = (Fb\nu\rho/\gamma)_j + \Delta \varepsilon_{j(\text{pro})}. \quad (17)$$

Под активным резервом просьюмера подразумевается тепловая мощность его собственного ИТ, которая также может использоваться как для покрытия части тепловой нагрузки в нормальном режиме, так и для обеспечения потребителя тепловой энергии при отказе централизованного теплоснабжения. Тепловая мощность ИТ просьюмера, обозначенная как  $\Delta q_{j(\text{pro})}$  (кДж/ч), в аварийном режиме используется для компенсации недоотпуска (полностью или частично) и должна учитываться при определении уровня подачи тепловой энергии в соответствующем режиме (при отказе некоторого элемента  $n$  системы):

$$q_{jn(\text{pro})} = q_{jn} + \Delta q_{j(\text{pro})}. \quad (18)$$

Для дальнейшей формализации задачи оптимизации надежности необходимо установить диапазоны возможных значений дополнительного временно резерва и тепловой мощности просьюмера:

$$\Delta q_{j(\text{pro})}^{\min} \leq \Delta q_{j(\text{pro})} \leq \Delta q_{j(\text{pro})}^{\max}; \quad (19)$$

$$\Delta \varepsilon_{j(\text{pro})}^{\min} \leq \Delta \varepsilon_{j(\text{pro})} \leq \Delta \varepsilon_{j(\text{pro})}^{\max}. \quad (20)$$

Применение скорректированных выражений (17) и (18) при определении показателя (11) и общесистемной интенсивности отказов (16) позволяет одновременно учесть эффект тепловой инерции, изменение тепловых нагрузок в течение расчетного периода и резервные функции просьюмера. Бо-

лее детализированное моделирование параметров просьюмера потребует применения специализированных физико-технических моделей, зависящих от типа технологий и оборудования просьюмера. В рамках разрабатываемой методологии нам принципиально важен укрупненный учет потенциально возможного резерва просьюмера, функционирующего в составе СЦРТ. Для этих целей на данном этапе исследований достаточно предложенных упрощенных моделей.

### 1.7. Формулировка задачи оптимизации надежности

Целевая функция рассматриваемой задачи оптимизации надежности, согласно ее постановке (п. 1.1), представляет собой затраты на обеспечение требуемого уровня надежности. В рамках данного исследования рассматриваются две составляющие этих затрат: 1) затраты на обеспечение полученных значений интенсивностей отказов элементов системы; 2) эксплуатационные затраты просьюмеров (п. 1.6). Соответствующая целевая функция может быть выражена следующим образом:

$$F_{\text{obj}} = \sum_{n \in E_n} f_n(\lambda_n) + \sum_{j \in J} [f_j(\Delta \varepsilon_{j(\text{pro})}) + f_j(\Delta q_{j(\text{pro})})], \quad (21)$$

где  $f_n(\lambda_n)$  (руб.) – функция затрат на обеспечение требуемых значений интенсивностей отказов элементов системы (применение дублирования элементов, горячего резервирования генерирующего оборудования, использование более надежных комплектующих, более надежных конструкций технологических узлов и т. д.);  $f_j(\Delta \varepsilon_{j(\text{pro})})$  и  $f_j(\Delta q_{j(\text{pro})})$  (руб.) – функции затрат на обеспечение пассивного и активного резерва просьюмеров.

Аналитические зависимости функций затрат определяются на основе фактических данных с использованием методов аппроксимации. В частности, аналитическая зависимость эксплуатационных затрат ИТ просьюмера от изменения их мощности для большинства типов источников описывается степенными функциями с численными коэффициентами. Эти вопросы подробно рассматриваются в работе [26]. Получение функций затрат на обеспечение требуемых параметров надежности элементов системы рассматривается в работе [24].

Распределение значения общесистемной интенсивности отказов по элементам системы осуществляется согласно следующему условию, полученному на основе уравнений моделируемого случайного процесса:

$$\Lambda_j \sum_{n \in E_n} p_n = \sum_{n \in E_n} \lambda_n p_n. \quad (22)$$

Распределение общесистемной интенсивности отказов по элементам производится в диапазонах технически возможных значений этих параметров:

$$\lambda_n^{\min} \leq \lambda_n \leq \lambda_n^{\max}. \quad (23)$$

Таким образом, задача оптимизации надежности ЦПРТ, сформулированная в п. 1.1, с учетом функций просьюмеров заключается в следующем:

– минимизировать целевую функцию (21) при условиях и ограничениях:

1) условие (16) для определения общесистемной интенсивности отказов элементов при выполнении требований надежности по показателю ВБР с учетом компонент (17) и (18) при наличии в системе просьюмеров;

2) условия (5)–(6) для определения уровней теплоснабжения потребителей в аварийных режимах, соответствующих отказам элементов системы;

3) условие (7) или (8) для определения вероятностей аварийных состояний (отказов) в зависимости от начальных условий моделирования марковского случайного процесса;

4) условие (22) оптимального распределения значения общесистемной интенсивности отказов по элементам системы;

5) ограничение (23) на технически возможные интенсивности отказов;

6) ограничения (19), (20) на параметры просьюмеров.

### 1.8. Общая методологическая схема оптимизации надежности

Методологическая схема оптимизации надежности ЦПРТ с учетом функций просьюмеров приведена на рис. 1. На данной схеме представлена взаимосвязь различных этапов представленной методологии, которые сгруппированы в 2 основные группы задач, соответствующие анализу и оптимизации (синтезу) надежности. Всего схема состоит из 9 расчетных этапов.

Группа задач анализа надежности включает 5 следующих этапов. На этапе 1 формируются исходные данные: расчетные технические параметры и схемы исследуемой системы (технологическая, надежностная), параметры надежности элементов системы (интенсивности отказов и восстановлений), параметры просьюмера (при наличии), графики тепловых нагрузок и прочие данные. Далее, на 2-м этапе формируется множество моделируемых состояний системы, соответствующих отказам элементов. На основе сформированного множества состояний производится расчет их вероятностей на основе марковской модели с использованием заданных параметров надежности (этап 3). Параллельно осуществляется физическое моделирование аварийных режимов на основе моделей потокораспределения в системе, приведенных в п. 1.3. Вероятности аварийных состояний и соответствующие им уровни подачи тепловой энергии используются совместно для расчета показателей надежности на этапе 5.

Оптимизационная часть методологии включает 4 следующих этапа. Этап 6 соответствует процедуре проверки полученных значений показателей надежности их требуемому (нормативному) уровню. При нарушении этих требований переходим к этапу 7, которому соответствует определение общесистемного параметра надежности элементов (в рамках данного исследования мы рассматриваем интенсивность отказов). При этом учитываются возможные дополнительные резервы просьюмера согласно моделям, рассмотренным в п. 1.5 и 1.6 (рис. 1).

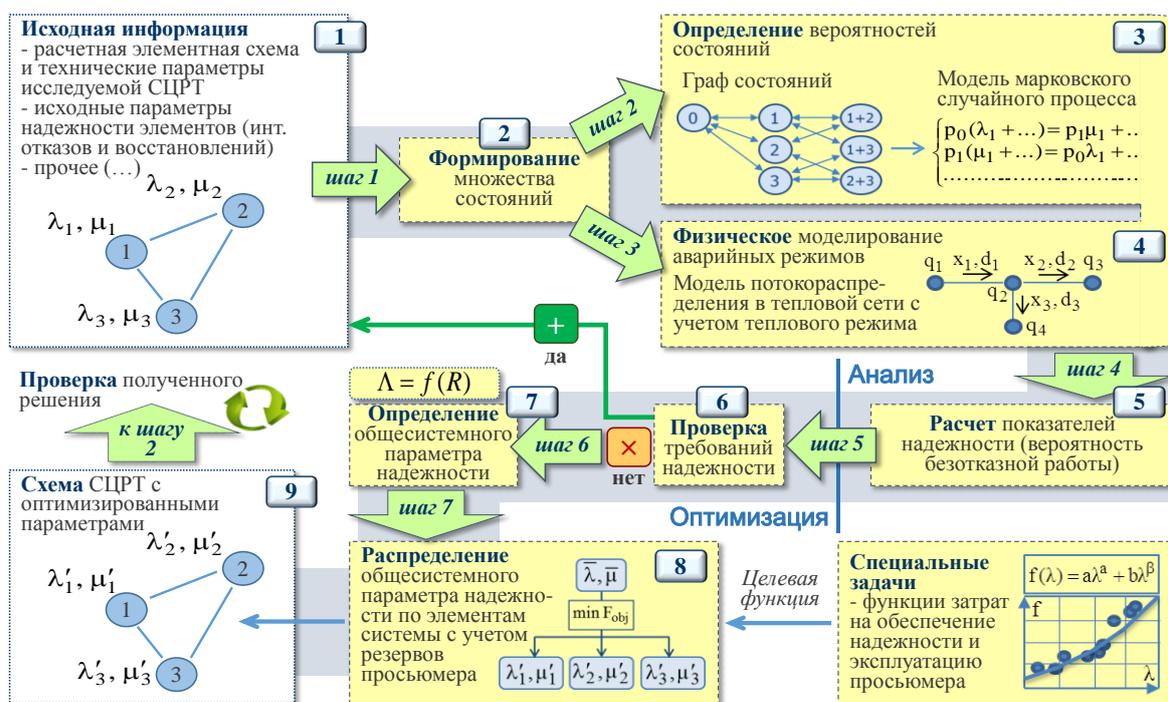


Рис. 1. Методологическая схема оптимизации надежности ЦПРТ с просьюмерами  
Fig. 1. General methodological schematic for the reliability optimization of DDHS

Далее на этапе 8 производится оптимальное распределение полученного системного потенциала обеспечения надежности по элементам системы в соответствии с формулировкой задачи, приведенной в п. 1.7. При этом используются функции затрат, получение которых относится к отдельной специальной задаче (см. пояснения в п. 1.7). В результате определяются оптимизированные значения параметров надежности элементов при выполнении требуемого уровня надежности системы (этап 9). Для верификации полученного решения необходимо повторно определить показатели надежности с учетом рассчитанных параметров надежности элементов и просьюмера. При выполнении условия по допустимой погрешности решение считается достоверным, в противном случае осуществляется его корректировка до требуемой точности.

**2. Вычислительный эксперимент**

Агрегированная тестовая схема исследуемой СЦРТ представлена на рис. 2-1а. Схема состоит из одного централизованного ИТ и ТС из 14 элементов (участков сети), параметры которых указаны на рис. 2-1а. Исследуемая схема содержит 13 узлов, 9 из которых являются потребителями, один из них – просьюмером с собственной генерацией (узел 2). Вместе со схемой ТС также рассматривается упрощенная схема ИТ, которая представлена на рис. 2-1б и соответствует основным технологическим узлам ТЭЦ: 1s – котлоагрегат, 2s – турбина, 3s – сетевой подогреватель, 4s – сетевой насос.

В соответствии с заданной схемой формируется множество состояний, включающих три

группы (подмножества): 1) состояния отказов элементов ИТ; 2) состояния отказов элементов ТС; 3) состояния совместных отказов элементов ИТ и ТС. Даная структура состояний представлена на рис. 2-2 в виде ориентированного графа. Этот граф, приведенный в сокращенном виде, отражает возможные связи между состояниями с ограничением на ординарность потока событий. В соответствии с представленным графом формируется система уравнений марковской стационарной модели вида (7). В результате решения этой системы с использованием заданных параметров надежности элементов мы определяем вероятности состояний. В результате физического моделирования аварийных состояний согласно модели (5), (6) мы получили соответствующие этим состояниям решения по потокораспределению в сети.

Функции затрат, формирующих целевую функцию (21), заданы с использованием ранее полученных результатов по аппроксимации данных в работах [24, 26]. В результате решения оптимизационной задачи надежности получены результаты, представленные в обобщенном виде на рис. 3. Поверхность, представленная на рис. 3-1, иллюстрирует зависимость между общесистемной интенсивностью отказов элементов системы и затратами на обеспечение требуемого уровня надежности теплоснабжения в зависимости от тепловой мощности просьюмера. Оптимальное решение в точке А соответствует минимальным затратам на обеспечение надежности, равным 59,2 млн руб., при следующем соотношении расчетных технических параметров: общесистемная интенсивность отказов – 0,0013 1/ч; оптимальная доля загрузки ИТ

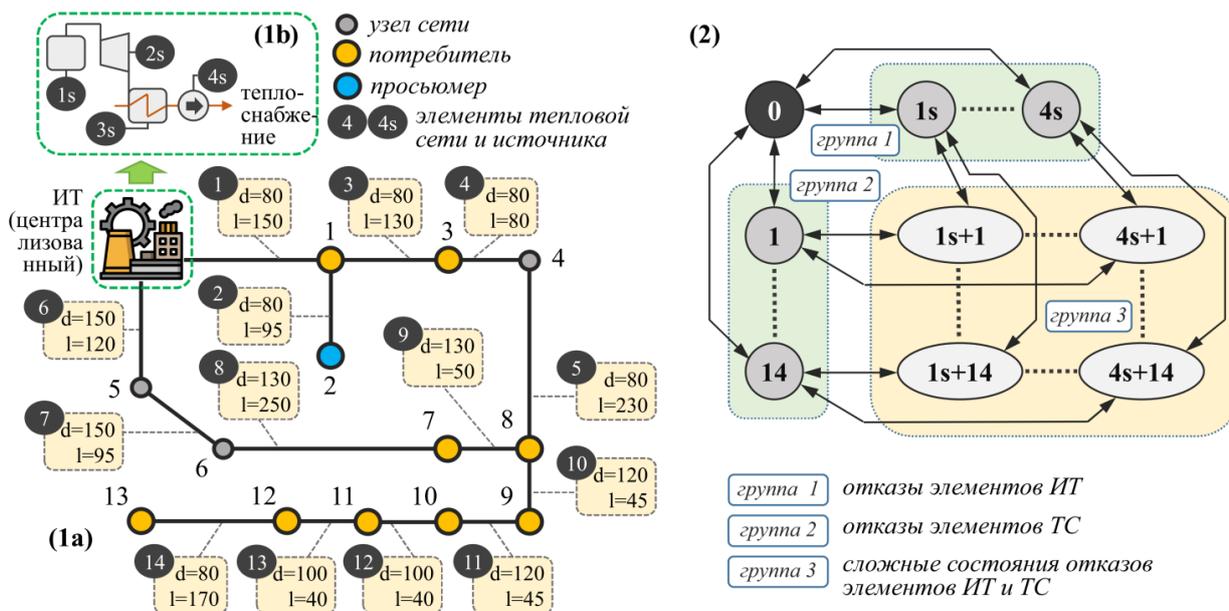


Рис. 2. Вычислительный эксперимент: 1а – общая расчетная схема рассматриваемой тестовой СЦРТ ( $d$  (м) – диаметр,  $l$  (м) – длина); 1б – укрупненная схема централизованного ИТ (ТЭЦ); 2 – граф состояний рассматриваемой системы

Fig. 2. Computational experiment: 1a – general calculation diagram of considered test DDHS ( $d$  (m) – diameter,  $l$  (m) – length); 1b – aggregated diagram of district HS (CHPP); 2 – graph of states for considered system

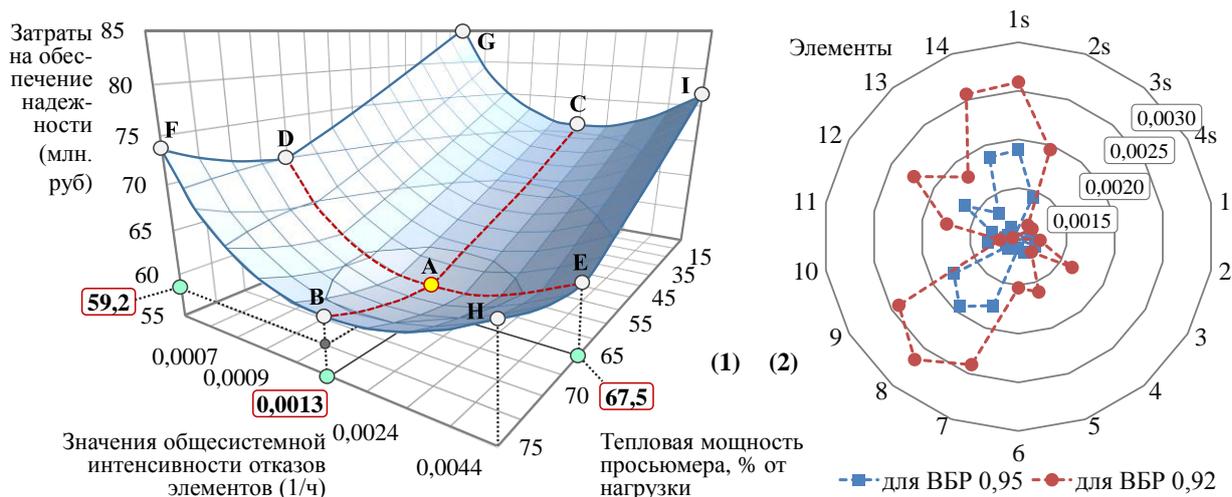


Рис. 3. Результаты определения оптимальных параметров надежности исследуемой СЦРТ: 1 – связь между общесистемной интенсивностью отказов элементов системы и затратами на обеспечение требуемого уровня надежности теплоснабжения в зависимости от тепловой мощности просьюмера; 2 – распределение общесистемной интенсивности отказов по элементам системы для двух уровней показателя надежности (ВБР)

Fig. 3. Results of defining the optimal reliability parameters of the studied DDHS: 1 – relation between system-wide failure rate of system components and costs to ensure the required reliability level of heat supply depending on the thermal power of prosumer; 2 – distribution of the system-wide failure rate among components for two levels of reliability index (FFOP)

просьюмера – 67,5 % от его расчетной тепловой нагрузки. Линия В-А-С соответствует оптимальным решениям по параметрам надежности при изменении мощности ИТ просьюмера. Линия D-A-E соответствует решениям при изменении интенсивности отказов элементов при фиксированном оптимальном значении доли покрытия тепловой нагрузки просьюмера собственными источниками. Крайние точки поверхности соответствуют диапазону заданных технических ограничений.

На рис. 3-2 показана диаграмма оптимального распределения рассчитанного уровня общесистемной интенсивности отказов по элементам системы в соответствии с критерием минимизации целевой функции затрат. Для сравнения показаны решения для двух значений требуемого показателя ВБР – 0,95 и 0,92 соответственно. Из данной диаграммы видно, что распределение по элементам неравномерное, что обусловлено неравнозначным влиянием различных элементов на надежность функционирования системы.

### Заключение

В результате проведенного исследования были получены следующие основные результаты:

1) сформулирована постановка методической задачи, которая состоит в поиске оптимального соотношения надежности элементов системы и резерва тепловой мощности просьюмеров (активных потребителей) в соответствии с экономическим критерием;

2) разработана методология решения поставленной задачи с применением различных методов и моделей: узловых показателей надежности (в частности, вероятности безотказной работы),

моделей марковского случайного процесса, закономерностей теплофизических процессов и графиков тепловых нагрузок и других;

3) предложенные методы и модели обобщены в рамках единой методологической схемы, состоящей из основных этапов анализа и оптимизации (синтеза) надежности;

4) проведен вычислительный эксперимент на основе тестовой упрощенной расчетной схемы СЦРТ с просьюмером;

5) полученные результаты проанализированы и представлены в кратком отчете о проведенном вычислительном эксперименте.

Основные преимущества разработанной методологии оптимизации СЦРТ заключаются в следующем. Предложенный нами подход к определению общесистемного параметра надежности элементов позволяет «априори» учесть необходимые требования к надежности при дальнейшем использовании этого параметра в оптимальном распределении его значения по элементам системы. Узловой принцип как при вероятностном, так и физическом моделировании позволяет получать детализированные распределенные по системе показатели. Это дает возможность выявлять «узкие» места в системе и оптимально определять необходимые условия по повышению ее надежности. Мы также учитываем функции просьюмеров, обеспечивающие дополнительный резерв по времени и тепловой мощности, которые могут значительно повысить надежность функционирования всей системы. Моделирование таких важных факторов, как эффект тепловой инерции и изменение тепловой нагрузки в течение расчетного периода, повышает прикладную значимость разработанных методов.

Направления дальнейших исследований связаны, в первую очередь, с более детализированным моделированием просьюмеров, а также с учетом возможности отпуска тепловой энергии от распределенных источников в централизованную систему – предполагается, что это может иметь

положительные эффекты. Другое перспективное направление исследований заключается в совместном решении задач оптимального управления и обеспечения надежности СЦРТ с учетом функционирования просьюмеров.

### Список литературы

1. The status of 4th generation district heating: Research and results / H. Lund, P. Østergaard, M. Chang et al. // *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 147–159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206
2. Smart energy systems and 4th generation district heating / H. Lund, N. Duic, P. Østergaard, B. Mathiesen // *Energy*. 2016. Vol. 110. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.105
3. Developing novel 5th generation district energy networks / A. Revesz, P. Jones, C. Dunham et al. // *Energy*. 2020. Vol. 201. P. 117389. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117389
4. A multivalent supply concept: 4th Generation District Heating in Moosburg an der Isar / A. Kallert, R. Egelkamp, U. Bader et al. // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7 (4). P. 110–118. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.032
5. The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system / P. Sorknæs, P. Østergaard, J. Zinck et al. // *Energy*. 2020. Vol. 213. P. 119030. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119030
6. Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system / I. Pakere, A. Gravelins, D. Lauka et al. // *Energy*. 2021. Vol. 234. P. 121245. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121245
7. Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review / D. Østergaard, K.M. Smith, M. Tunzi, S. Svendsen // *Energy*. 2022. Vol. 248. P. 123529. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123529
8. A comparison of prosumer system configurations in district heating networks / D. Zinsmeister, T. Lickleder, F. Christange et al. // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7 (4). P. 430–439. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.085
9. Selvakkumaran S., Axelsson L., Svensson I. Drivers and barriers for prosumer integration in the Swedish district heating sector // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7 (4). P. 193–202. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.155
10. Optimize heat prosumers' economic performance under current heating price models by using water tank thermal energy storage / H. Li, J. Hou, Z. Tian et al. // *Energy*. 2022. Vol. 239. P. 122103. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122103
11. Implementing prosumers into heating networks / M. Gross, B. Karbasi, T. Reinert et al. // *Energy*. 2021. Vol. 230. P. 120844. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120844
12. Stanica D.-I., Bachmann M., Kriegel M. Design and performance of a multi-level cascading district heating network with multiple prosumers and energy storage // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7 (4). P. 128–139. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.163
13. Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers / M. Pipiciello, M. Caldera, M. Cozzini et al. // *Energy*. 2021. Vol. 223. P. 120036. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120036
14. Penkovskii A., Stennikov V., Kravets A. Bi-level modeling of district heating systems with prosumers // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6 (2). P. 89–95. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.046
15. Стенников В.А., Пеньковский А.В., Кравец А.А. Двухуровневое моделирование теплоснабжающих систем с учетом активных потребителей // *Промышленная энергетика*. 2021. № 6. С. 10–19. DOI: 10.34831/EP.2021.50.43.002
16. Brange L., Englund J., Lauenburg P. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study // *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. P. 492–500. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.020
17. Smart district heating networks – A simulation study of prosumers' impact on technical parameters in distribution networks / L. Brand, A. Calvén, J. Englund et al. // *Applied Energy*. 2014. Vol. 129. P. 39–48. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.079
18. Dynamic modeling of local district heating grids with prosumers: A case study for Norway / H. Kauko, K. Kvalsvik, D. Rohde et al. // *Energy*. 2018. Vol. 151. P. 261–271. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.033
19. Postnikov I. Methods for optimization of time redundancy of prosumer in district heating systems // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6 (2). P. 214–220. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.065
20. Постников И.В. Оптимизация надежности теплоснабжения с учетом функций активного потребителя // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2021. Т. 21, № 2. С. 5–13. DOI: 10.14529/power210201
21. Надежность систем теплоснабжения / Е.В. Сеннова, А.В. Смирнов, А.А. Ионин и др. Новосибирск: Наука, 2000. 351 с.
22. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1985. 222 с.
23. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 272 с.

24. Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems / I. Postnikov, V. Stennikov, E. Mednikova, A. Penkovskii // *Applied Energy*. 2018. Vol. 227. P. 365–374. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.073
25. Соколов В.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 472 с.
26. Penkovsky A., Stennikov V., Khamisov O. Optimum Load Distribution between Heat Sources Based on the Cournot Model // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. P. 598–606. DOI: 10.1134/S0040601515080054

### References

1. Lund H., Østergaard P., Chang M. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*. 2018;164:147–159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206
2. Lund H., Duic N., Østergaard P., Mathiesen B. Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy*. 2016;110:1–4. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.105
3. Revesz A., Jones P., Dunham C. et al. Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*. 2020;201:117389. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117389
4. Kallert A., Egelkamp R., Bader U. et al. A multivalent supply concept: 4th Generation District Heating in Moosburg an der Isar. *Energy Reports*. 2021;7(4):110–118. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.032
5. Sorknæs P., Østergaard P., Zinck J. et al. The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system. *Energy*. 2020;213:119030. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119030
6. Pakere I., Gravelins A., Lauka D. et al. Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system. *Energy*. 2021;234:121245. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121245
7. Østergaard D., Smith K.M., Tunzi M., Svendsen S. Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*. 2022;248:123529. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123529
8. Zinsmeister D., Lickleder T., Christange F. et al. A comparison of prosumer system configurations in district heating networks. *Energy Reports*. 2021;7(4):430–439. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.085
9. Selvakkumaran S., Axelsson L., Svensson I. Drivers and barriers for prosumer integration in the Swedish district heating sector. *Energy Reports*. 2021;7(4):193–202. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.155
10. Li H., Hou J., Tian Z. et al. Optimize heat prosumers' economic performance under current heating price models by using water tank thermal energy storage. *Energy*. 2022;239:122103. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122103
11. Gross M., Karbasi B., Reiners T. et al. Implementing prosumers into heating networks. *Energy*. 2021;230:120844. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120844
12. Stanica D.-I., Bachmann M., Kriegel M. Design and performance of a multi-level cascading district heating network with multiple prosumers and energy storage. *Energy Reports*. 2021;7(4):128–139. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.163
13. Pipicciello M., Caldera M., Cozzini M. et al. Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Energy*. 2021;223:120036. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120036
14. Penkovskii A., Stennikov V., Kravets A. Bi-level modeling of district heating systems with prosumers. *Energy Reports*. 2020;6(2):89–95. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.046
15. Stennikov V.A., Pen'kovskiy A.V., Kravets A.A. [Bi-level modeling of district heating systems accounting prosumers]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2021;(6):10–19. DOI: 10.34831/EP.2021.50.43.002 (In Russ.)
16. Brange L., Englund J., Lauenburg P. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study. *Applied Energy*. 2016;164:492–500. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.020
17. Brand L., Calvén A., Englund J. et al. Smart district heating networks – A simulation study of prosumers' impact on technical parameters in distribution networks. *Applied Energy*. 2014;129:39–48. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.079
18. Kauko H., Kvalsvik K., Rohde D. et al. Dynamic modeling of local district heating grids with prosumers: A case study for Norway. *Energy*. 2018;151:261–271. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.033
19. Postnikov I. Methods for optimization of time redundancy of prosumer in district heating systems. *Energy Reports*. 2020;6(2):214–220. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.065
20. Postnikov I.V. Optimization of Heat Supply Reliability with Account to the Active Consumer Functions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021;21(2):5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210201
21. Sennova E.V., Smirnov A.V., Ionin A.A. et al. *Nadezhnost' sistem teplosnabzheniya* [Reliability of heating systems]. Novosibirsk: Nauka; 2000. 351 p. (In Russ.)
22. Sennova E.V., Sidler V.G. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya razvivayushchikhsya teplosnabzhayushchikh sistem* [Mathematical modeling and optimization of developing heat supply systems]. Novosibirsk: Nauka; 1985. 222 p. (In Russ.)

23. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskih tsepey* [The theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka; 1985. 272 p. (in Russ.)

24. Postnikov I., Stennikov V., Mednikova E., Penkovskii A. Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems. *Applied Energy*. 2018;227:365–374. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.073

25. Sokolov V.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [District heating introduction and heating networks]. Moscow: Publishing house of Moscow Power Engineering Institute; 1999. 472 p. (In Russ.)

26. Penkovsky A., Stennikov V., Khamisov O. Optimum Load Distribution between Heat Sources Based on the Cournot Model. *Thermal Engineering*. 2015;62:598–606. DOI: 10.1134/S0040601515080054

#### *Информация об авторах*

**Постников Иван Викторович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Лаборатория систем теплоснабжения, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия; postnikov@isem.irk.ru.

**Медникова Екатерина Евгеньевна**, научный сотрудник, Лаборатория систем теплоснабжения, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия; yakimetse@isem.irk.ru.

#### *Information about the authors*

**Ivan V. Postnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Heat Supply Systems, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia; postnikov@isem.irk.ru.

**Ekaterina E. Mednikova**, Researcher, Laboratory of Heat Supply Systems, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia; yakimetse@isem.irk.ru.

*Статья поступила в редакцию 24.03.2022; одобрена после рецензирования 30.03.2022; принята к публикации 30.03.2022.*

*The article was submitted 24.03.2022; approved after reviewing 30.03.2022; accepted for publication 30.03.2022.*