
УДК 620.9:697.341:658.264:519.718.2:65.011.46

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЕКТОРА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ВНЕДРЕНИЕМ ПРОСЬЮМЕРА

© 2025 г. В. А. Стенников^{1,*}, И. В. Постников^{1,**}, Е. Е. Медникова^{1,***}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск, Россия

*e-mail: sva@isem.irk.ru

**e-mail: postnikov@isem.irk.ru

***e-mail: isem348@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2024 г.

После доработки 23.12.2024 г.

Принята к публикации 26.12.2024 г.

Представлены основные результаты практического применения разработанного авторами методического обеспечения для решения задач эффективного развития теплоснабжающих систем, включая определение зон эффективности централизованного теплоснабжения, технико-экономическую оценку имплементации распределенных источников тепловой энергии просьюмеров на границах радиусов эффективного теплоснабжения, анализ и обеспечение надежности теплоснабжения потребителей централизованно-распределенного сектора системы.

Ключевые слова: централизованно-распределенная теплоснабжающая система, просьюмер, радиус эффективного теплоснабжения, анализ надежности, обеспечение надежности, узловые показатели надежности теплоснабжения, экономический эффект

DOI: 10.31857/S0002331025010019

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТСС

Исследуемая теплоснабжающая система (ТСС) функционирует в одном из административных районов г. Иркутска, обеспечивая тепловой энергией (ТЭ) потребителей с суммарной нагрузкой 219 Гкал/ч. Конфигурация системы на карте местности показана на рис. 1. Централизованным источником тепла (ИТ) является крупная паровая котельная установленной мощностью 257 Гкал/ч, отпускающая ТЭ по температурному графику 138/70°C. Теплоноситель от источника доставляется до потребителей по тепловой сети (ТС) общей протяженностью 38.2 км, состоящей из 368 узлов и 367 участков трубопроводов диаметрами 150–804 мм. Максимальный радиус

теплоснабжения составляет 7860 м. На основе исходной структуры системы сформирована расчетная схема из 92 узлов, полученная путем агрегирования последовательно соединенных участков сети с одинаковыми параметрами. Прочие исходные данные приняты в соответствии с действующими нормативными документами [1, 2].

2. АНАЛИЗ ГРАНИЦ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Для исследуемой ТСС проведена оценка радиусов эффективного теплоснабжения (РЭТ) с помощью методических подходов, изложенных в работах [3–5]. Результаты расчетов приведены на рис. 2. Для каждого узла расчетной схемы определена стоимость ТЭ, включающая затраты на ее производство и транспортировку до заданного узла-потребителя.

Нормативная узловая стоимость ТЭ для рассматриваемой системы установлена на уровне 1694 руб./Гкал (определена как средневзвешенная по системе). Узлы, для которых стоимость ТЭ превышает это значение, находятся за границами радиуса эффективного теплоснабжения (РЭТ). Например, конечный узел ТК* расположен на удалении 5463 м от ИТ по трассе сети (точка “а”), тогда как граница РЭТ для данного трубопровода расположена на расстоянии 3658 м (точка “b”). Всего в системе выявлено 14 ответвлений (секторов) сети с превышением границ РЭТ, которые обозначены на рис. 2 как В1–В14. Распределение показателей РЭТ с существующей протяженностью тепловой сети до конечных узлов исследуемой схемы ТСС



Рис. 1. Исследуемая ТСС на карте местности (приблизительная конфигурация).

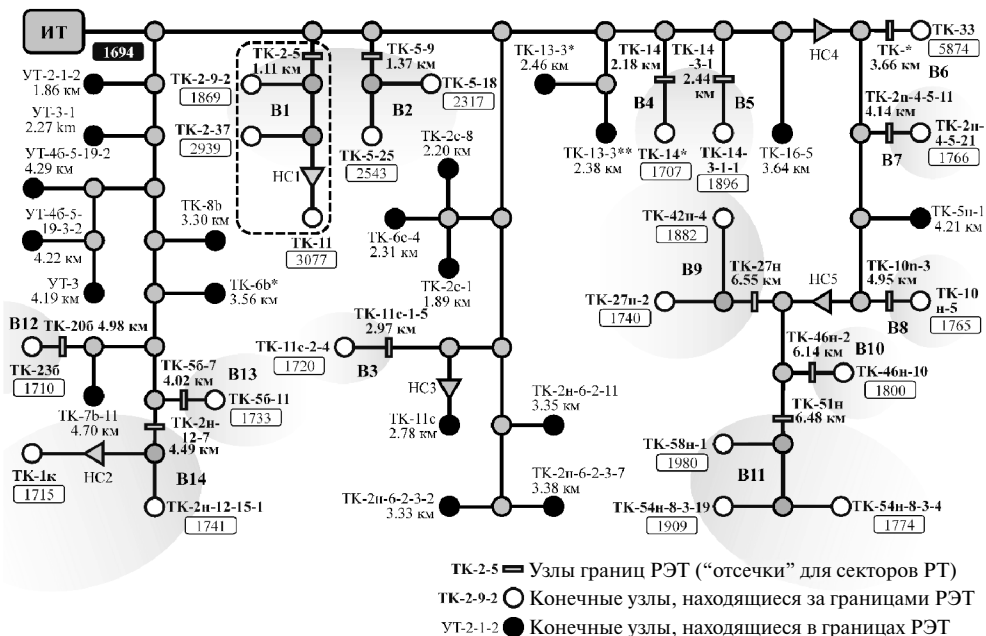


Рис. 2. Расчетная схема исследуемой ТСС с решениями по РЭТ (для узлов, находящихся за границами радиуса, указана стоимость тепловой энергии, руб./Гкал).

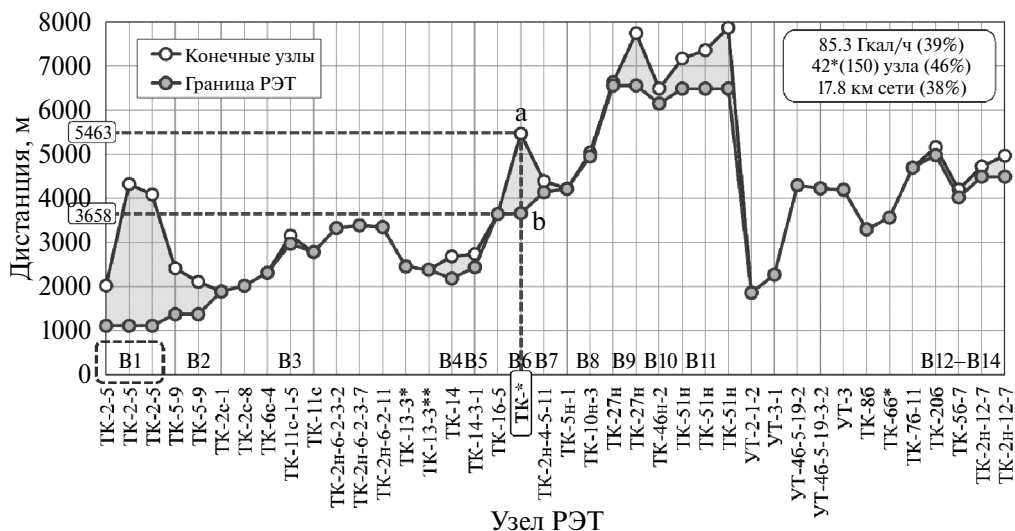


Рис. 3. Результаты оценки границ РЭТ для исследуемой системы.

представлены на рис. 3. По графику можно количественно оценить превышение фактического радиуса от эффективного в каждом узле. Так, в результате оценки РЭТ исследуемой ТСС определено, что за границами эффективности централизованного теплоснабжения расположены 14.8 км (38%) трубопроводов ТС и 42 (46%) узла расчетной схемы (150 для полной схемы) с суммарной нагрузкой 85.3 Гкал/ч (39%).

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЕКТОРА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПРОСЬЮМЕРА

Рассматривается ответвление В1 в узле границы РЭТ “ТК-2-5”, расположенной на сетевой дистанции 1110 м от централизованного источника (рис. 2 и 3). В этой точке размещается дополнительный ИТ, обеспечивающий ТЭ всех потребителей ответвления В1. Соответствующая зона на рис. 2 выделена штриховым контуром. Обобщенный потребитель ответвления В, оставаясь фактически подключенным к централизованной системе, обладает собственной тепловой генерацией [6, 7]. В качестве ИТ просьюмера рассматривается котельная. Основные характеристики формируемой системы просьюмера следующие: мощность ИТ – 10 Гкал/ч; нагрузка – 8.83 Гкал/ч; протяженность сети – 4520 м. На рис. 4а показаны смещения границ РЭТ для системы просьюмера (ответвление В1).

Расчет показал, что в зоне РЭТ расположены 24 из 35 узлов системы просьюмера (69%) с нагрузкой 7.78 Гкал/ч (88%) и 3734 м сети (83%), а максимальное смещение границ РЭТ составило 2978 м (узел ТК-14). Для одного из трех конечных узлов схемы (ТК-2-9-2) требования по критерию РЭТ выполняются, а два других (ТК-2-37 и ТК-11) по-прежнему находятся за его границами. При этом стоимость ТЭ для всех узлов значительно снижена по сравнению с исходной схемой теплоснабжения от централизованного источника: среднее снижение стоимости составило 548 руб./Гкал (25%). Распределение узловой стоимости ТЭ по узлам схемы теплоснабжения просьюмера представлено на рис. 4б. Предполагается, что часть схемы, находящаяся

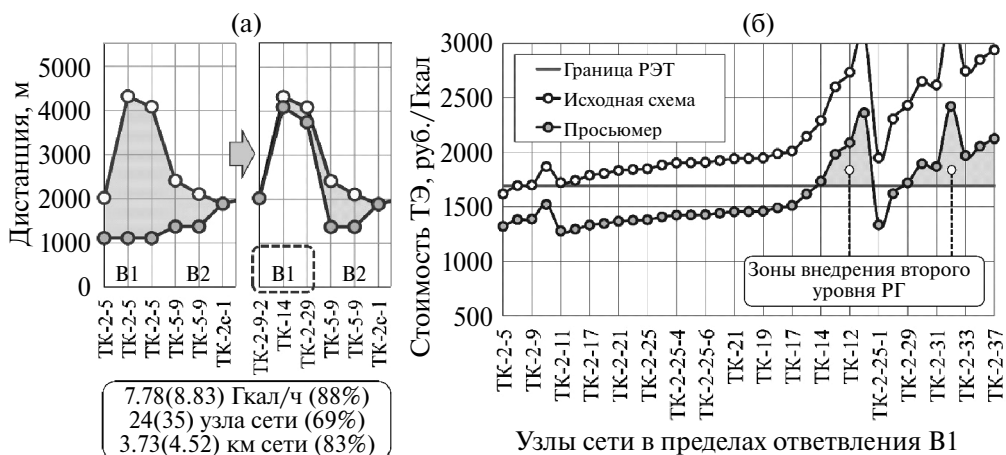


Рис. 4. Результаты оценки границ РЭТ для системы просьюмера: (а) смещение границ РЭТ в пределах выбранного сектора распределенного теплоснабжения; (б) распределение узловой стоимости ТЭ.

вне границ РЭТ (12% по нагрузке), предназначена для внедрения второго уровня РТ. Вопросы оптимального согласования графиков загрузки централизованных и распределенных ИТ составляют предмет отдельного исследования и выходят за рамки данной работы. Некоторые методические решения по данному вопросу предложены в [8, 9].

4. АНАЛИЗ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЕКТОРА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРОСЬЮМЕРОМ

Теплоснабжение в распределенном секторе просьюмера должно отвечать не только требованиям экономической эффективности (в этом и состоит основная цель его имплементации), но и требованиям надежности. Для проведения анализа надежности рассматриваемой системы просьюмера используются расчетные схемы, представленные на рис. 5. На рис. 5а приведена принципиальная технологическая схема ИТ просьюмера, состоящая из традиционных элементов котельной [10]: 1 – сетевой насос; 2 – котел; 3 – циркуляционный насос; 4 и 5 – подогреватели очищенной и исходной воды; 6 – деаэратор; 7 – подпиточный насос; 8 – насос исходной воды; 9 – фильтр водоочистки; 10 – охладитель выпара деаэратора. Параметры надежности элементов ИТ (интенсивности отказов и восстановлений) приняты согласно статистическим данным, приведенным в [11].

Для упрощения расчетов элементы сгруппированы в технологические узлы, как это показано на рис. 5а, и обозначены номерами 1–5. Интенсивности отказов элементов агрегированной схемы определены согласно правилу суммирования несовместных событий, интерпретируемых как независимые отказы устройств, входящих в состав этих элементов. Интенсивности восстановлений для тех же агрегированных элементов принимаются по устройству с максимальным временем восстановления. Схема теплосетевой части показана на рис. 5б и состоит из трех агрегированных участков (элементы 6–8), объединяющих 34 элемента исходной схемы. Для каждого участка определена интенсивность отказов в зависимости от его протяженности на основе расчетного удельного значения $0.2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/(км} \cdot \text{ч)}$ [11]. Интенсивности

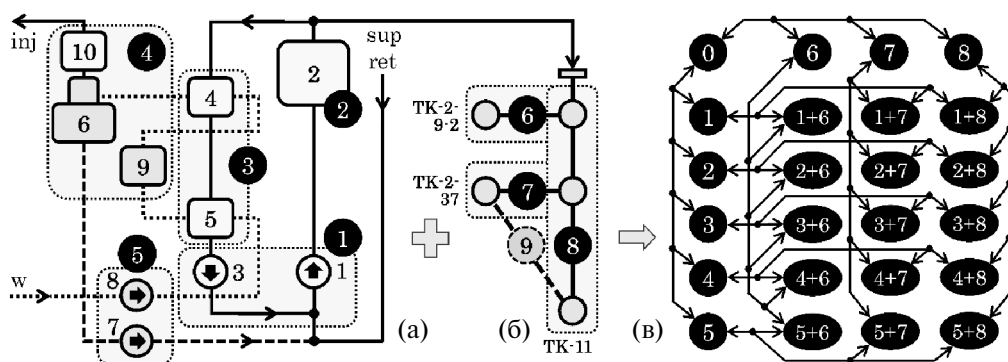


Рис. 5. К анализу надежности: (а) принципиальная технологическая схема ИТ просьюмера (котельная); (б) агрегированная схема подключенной к просьюмеру сети (ответвление В1 на рис. 2); (в) граф состояний локальной системы теплоснабжения, подключенной к распределенному источнику просьюмера.

восстановления трубопроводов определены в зависимости от диаметров по эмпирическим зависимостям, приведенным в [11].

Множество состояний исследуемой системы формируется из отказов элементов расчетных схем источника и сети, а также их сочетаний (сложные состояния). Структура событий, связывающих эти состояния, формируется при условии простейшего потока событий. Полученный таким образом граф состояний и переходов между ними представлен на рис. 5в. Эволюция состояний описывается стационарным марковским процессом, формализуемым в виде системы алгебраических уравнений [12, 13]. В результате решения этой системы определены вероятности состояний системы. Последствия отказов определены путем теплогидравлического моделирования аварийных режимов [14], соответствующих отказам элементов схемы.

По результатам проведенных расчетов были получены значения узлового показателя вероятности безотказной работы (ВБР), приведенные на рис. 6.

Требуемый уровень этого показателя, согласно [11], составляет 0.951. Как можно видеть из диаграммы, уровень надежности локализованной системы при подключении просьюмера значительно повышается по сравнению с исходной схемой: рост составляет 44% (по количеству узлов). Тем не менее значительная часть схемы остается в зоне пониженной надежности. Для сокращения этой зоны в схему вводится резервный сетевой элемент 9 (рис. 5б) – “перемычка”, закольцовывающая резервируемую часть системы с конечным узлом ТК-11 и ответвление с конечным узлом ТК-2-37. Такая структура позволяет перераспределять потоки теплоносителя при отказах протяженной последовательности участков агрегированного элемента 8 (рис. 5б), что обеспечивает аварийную подачу ТЭ в узлах резервируемой части. Оценка надежности резервированной схемы показала, что включение “перемычки” позволяет повысить надежность теплоснабжения (по показателю ВБР) еще на 18% до уровня 62% от уровня исходной схемы (рис. 6). При этом наблюдается эффект конфликта резервирования [11], состоящий в некотором понижении максимального

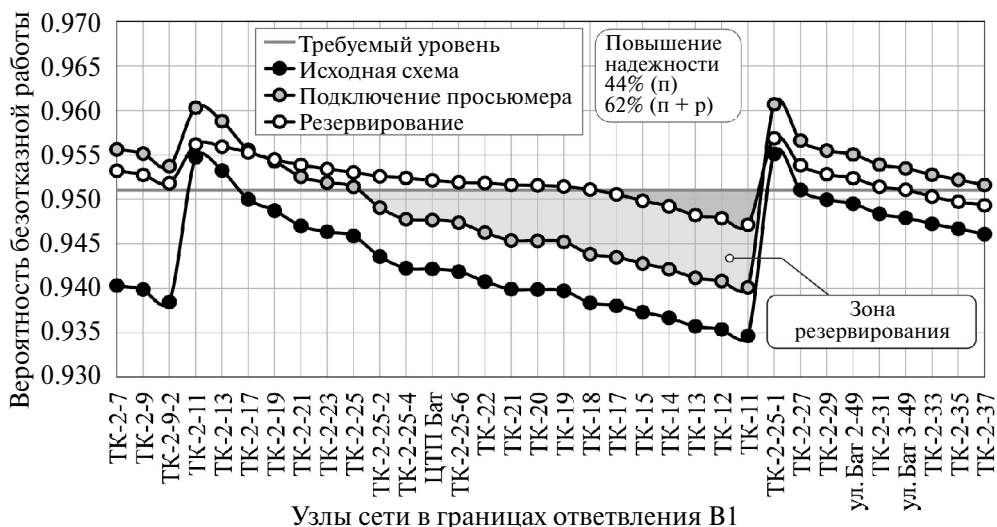


Рис. 6. Результаты анализа надежности исследуемой системы просьюмера.

уровня надежности системы (расчетного теплоснабжения) вследствие увеличения числа потенциальных отказов и гидравлической связанности резервных участков с системой: в итоге надежность по всем узлам распределяется более равномерно (см. соотношение синего и зеленого графиков на рис. 6).

Наряду с полученными количественными ПН, формирование подсистемы распределенного теплоснабжения на базе просьюмера имеет дополнительные преимущества в отношении надежности. Так, ИТ просьюмера увеличивает временную и функциональную избыточность как для самой распределенной подсистемы, так и для всей ТСС в целом. Это связано не только со снижением нагрузки на систему, но и компенсацией недоотпуска ТЭ в аварийных режимах, в том числе с учетом возможности ее подачи из системы просьюмера к потребителям централизованной части системы. И то и другое значительно повышает надежность теплоснабжения как самих подсистем просьюмера, так и надежность всей системы, охватывая “неактивных” потребителей, не обладающих дополнительной генерацией и резервами. Кроме того, в периоды максимальных тепловых нагрузок (при минимальных наружных температурах), ИТ просьюмера может работать как пиковый источник, снижая нагрузку на централизованные ИТ и вероятность аварийных состояний, связанных с отказами оборудования, работающего в такие периоды, как правило, на предельных режимах. Помимо повышения безотказности подсистема просьюмера становится гидравлически более устойчивой вследствие сокращения радиуса действия, а следовательно, повышается и ее управляемость.

5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЕКТОРА С ПРОСЬЮМЕРОМ

Экономический эффект от локализации распределенного сектора теплоснабжения на базе просьюмера обусловлен двумя факторами: 1) снижением стоимости тепловой энергии за счет сокращения эксплуатационных сетевых затрат на перекачку теплоносителя вследствие уменьшения дальности транспорта ТЭ (уменьшения радиуса теплоснабжения); 2) сокращением ущерба от недоотпуска тепловой энергии за счет повышения надежности (см. п. 4).

Суммарный экономический эффект оценивается на уровне 93.85 млн руб./год, что составляет 48.1% от эксплуатационных затрат, соответствующих исходной схеме теплоснабжения в пределах рассматриваемого сектора В1 (рис. 2). Распределение этих эффектов по узлам представлено на рис. 7. Как видно из графика, основная часть экономии связана со снижением стоимости ТЭ и составляет 87.53 млн руб./год (44.8%) и лишь 6.32 млн руб./год (3.2%) — с сокращением ожидаемого ущерба.

Однако следует отметить, что понятие экономического ущерба для систем теплоснабжения весьма условно, поскольку последствия от недоотпуска ТЭ могут быть значительно более тяжелыми, чем их формальное выражение в виде потерь прибыли от ее реализации. Очевидно, повышение надежности теплоснабжения не может быть интерпретировано исключительно экономическим эффектом.

За счет покрытия части нагрузки распределенным ИТ возможен дополнительный экономический эффект в централизованной системе, связанный со снижением эксплуатационных сетевых затрат. При решении задачи оптимального согласования графиков загрузки централизованных и распределенных ИТ в течение расчетного периода, о которой мы упоминали в п. 3, могут быть получены результаты,

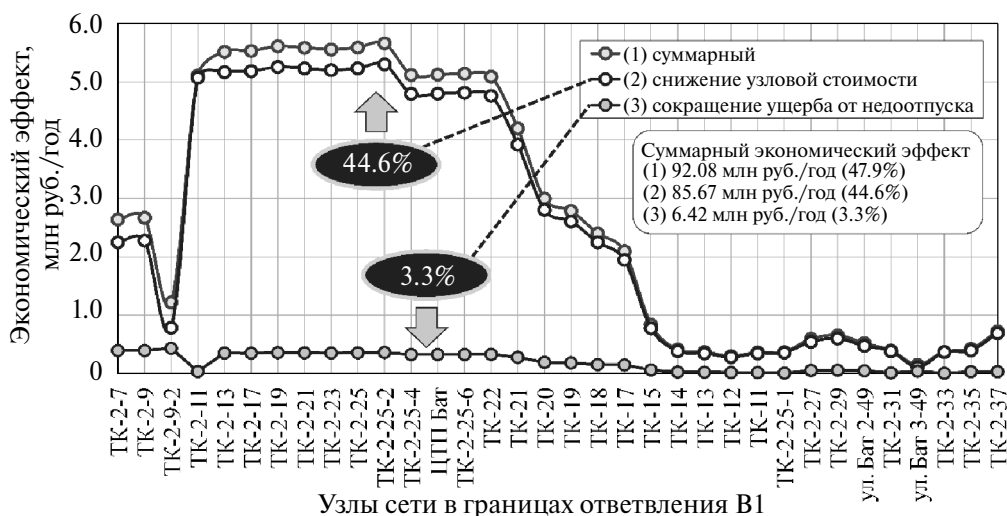


Рис. 7. Распределение экономического эффекта по узлам систем просьюмера.

влияющие на величину экономического эффекта. Это связано с изменением отпуская тепловой энергии от ИТ просьюмера и соответствующих эксплуатационных затрат. Чем большая часть нагрузки будет покрываться собственной генерацией внутри сектора, тем меньше потребуются корректировки полученного эффекта. При этом на величину эффекта от сокращения ущерба указанное обстоятельство не влияет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи практического исследования заключались, с одной стороны, в проверке работоспособности разработанного авторами методического обеспечения, а с другой — расчетного подтверждения предполагаемых эффектов от формирования распределенного сектора теплоснабжения на границах РЭТ исследуемой ТСС. Обе задачи были решены. Так, например, эффект повышения надежности при локализации исследуемого сектора распределенного теплоснабжения, подключенного к ИТ просьюмера, составляет 44%, а структурное резервирование схемы позволяет повысить надежность до 62%. Суммарный экономический эффект оценивается на уровне 93.85 млн руб./год или 48.1% от эксплуатационных затрат, соответствующих исходной схеме теплоснабжения.

В продолжение проводимого практического исследования предполагается решить следующие задачи:

- проведение расчетов границ РЭТ, надежности и экономического эффекта для остальных секторов распределенного теплоснабжения;
- анализ по обеспечению надежности централизованной части системы с учетом дополнительных резервов, обеспечиваемых за счет тепловой мощности просьюмеров;

- определение оптимальной загрузки централизованного и распределенных источников в течение расчетного периода (потребуется дополнительное методического исследования);
- корректировка экономических показателей в зависимости от результатов оптимальной загрузки источников;
- определение масштабов реконструкции централизованной части системы, которая может потребоваться при передаче значительного объема нагрузки в распределенный сектор;
- анализ различных технологий производства ТЭ (в том числе когенерационные) на предмет возможности и целесообразности их применения в качестве ИТ просьюмеров.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 23-01-99 “Строительная климатология”. М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, 2000.
2. Приказ Минэнерго России № 565, Минрегиона России № 667 от 29.12.2012 “Об утверждении методических рекомендаций по разработке схем теплоснабжения”.
3. *Stennikov V., Iakimetc E.* Optimal planning of heat supply systems in urban areas. *Energy*, 2016, Vol. 110, P. 157–165.
4. *Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A.* Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23(2), P. 207–221.
5. *Стенников В.А., Медникова Е.Е., Постников И.В., Пеньковский А.В., Добровольская Т.В.* Разработка методики расчета радиуса эффективного теплоснабжения. *Промышленная энергетика*, 2017, № 11, С. 25–32.
6. *Zinsmeister D., Lickleder T., Christange F. et al.* A comparison of prosumer system configurations in district heating networks. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7(4), P. 430–439.
7. *Gross M., Karbasi B., Reinert T. et al.* Implementing prosumers into heating networks. *Energy*, 2021, Vol. 230, 120844.
8. *Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A.* Prosumer in the district heating systems: Operating and reliability modeling. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 10, P. 2530–2535.
9. *Penkovskii A., Stennikov V., Kravets A.* Bi-level modeling of district heating systems with prosumers. *Energy Reports*, 2020, Vol. 6(2), P. 89–95.
10. *Соколов В.Я.* Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательство МЭИ, 1999.
11. *Сеннова Е.В., Смирнов А.В., Ионин А.А. и др.* Надежность систем теплоснабжения. Новосибирск: Наука, 2000.
12. *Антонов Г.Н., Зоркальцев В.И., Криворучий Л.Д. и др.* Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики (под ред. Руденко Ю.Н.). М.: Энергоатомиздат, 1994.
13. *Postnikov I., Stennikov V., Mednikova E., Penkovskii A.* Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems. *Applied Energy*, 2018, Vol. 227, P. 365–374.
14. *Сеннова Е.В., Сидлер В.Г.* Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987.

Determination of Efficiency and Reliability Criteria for the Actual District Heating System and Proposals for the Development of a Distributed Heating Supply Area Based on Prosumer

V. A. Stennikov^{a, *}, I. V. Postnikov^{a, **}, E. E. Mednikova^{a, *}**

^aEnergy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

^{}e-mail: sva@isem.irk.ru*

*^{**}e-mail: postnikov@isem.irk.ru*

*^{***}e-mail: isem348@mail.ru*

The paper presents the main results of practical application of the developed methodology for efficient expansion of district heating systems. The methodology at issue involves determining the efficiency areas of district heating, assessing technically and economically the implementation of distributed heating sources of prosumers at the boundaries of effective heat supply radius; analyzing and ensuring the reliability of heating to consumers in the district-distributed area of the system.

Keywords: district-distributed heating systems, prosumer, radius of effective heat supply, reliability of heating, indices of nodal reliability, economic effect