

УДК 620.9 : 697.341 : 658.264 : 519.718.2 : 65.011.46

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ

© 2024 г. В. А. Стенников<sup>1,\*</sup>, И. В. Постников<sup>1,\*\*</sup>, Е. Е. Медникова<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное 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 12.11.2024 г.

Принята к публикации 14.11.2024 г.

Предлагается методология решения задач оптимального развития теплоснабжающих систем: анализа зон эффективности и надежности теплоснабжения потребителей. При решении обеих задач применяется узловой подход, позволяющий получать наиболее детализированные результаты, максимально адаптированные к реальным условиям. На основе предложенных методов и моделей разработан алгоритм трансформации существующих теплоснабжающих систем в централизованно-распределенные системы с имплементацией просьюмеров (активных потребителей) для покрытия нагрузки, выходящей за границы эффективности централизованного теплоснабжения.

*Ключевые слова:* централизованно-распределенная теплоснабжающая система, просьюмер, радиус эффективного теплоснабжения, надежность теплоснабжения, показатели узловой надежности

**DOI:** 10.31857/S0002331024050017

### ВВЕДЕНИЕ

Оптимальное развитие теплоснабжающих систем (ТСС) предполагает решение многих научно-методических задач. В фундаментальной монографии [1] приведена достаточно обширная методическая база для их решения применительно к традиционным действующим централизованным ТСС. В то же время на современном этапе развития ТСС трансформируются в системы *централизованно-распределенного* типа, оптимально сочетающие централизованную и распределенную генерацию тепловой энергии (ТЭ) с интеграцией различных энергетических технологий (в том числе возобновляемой энергетики) для достижения максимальной эффективности

и надежности теплоснабжения потребителей. Данный этап энергоперехода в теплоснабжении соответствует так называемым системам теплоснабжения 4-го поколения<sup>1</sup> [2–5] (4G district heating systems). Сектор распределенного теплоснабжения в этих системах формируется прежде всего на уровне активных потребителей или *просьюмеров* [6–9] (prosumer: professional consumer или producer & consumer). Внедрение просьюмеров с собственными источниками тепловой энергии (ИТ) определяет новые свойства функционирования рассматриваемых систем, что требует разработки методического обеспечения для решения задач их функционирования, управления и развития. Одной из таких задач является определение оптимального соотношения секторов централизованного и распределенного теплоснабжения. При этом эффективные технико-экономические решения должны отвечать требованиям надежности теплоснабжения потребителей.

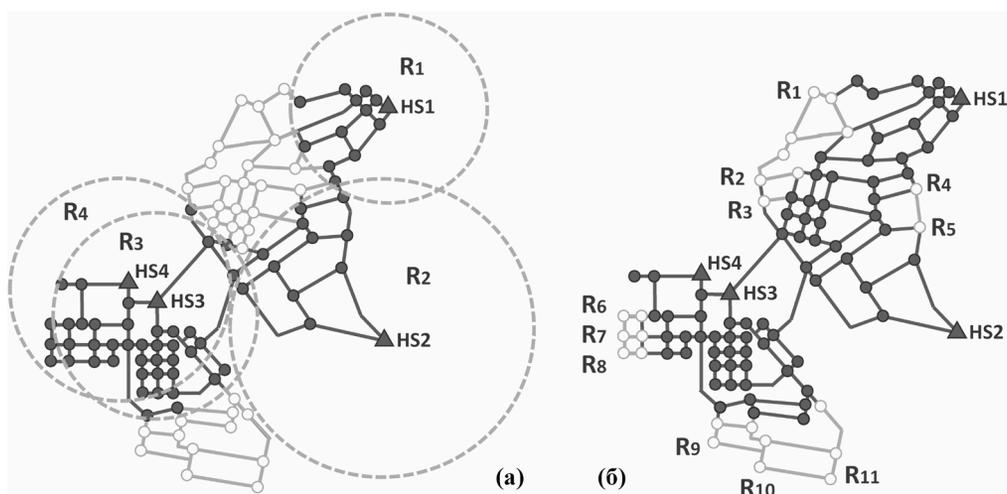
В настоящей работе предлагается ряд методов и алгоритм для решения научно-методических задач анализа и обеспечения эффективности и надежности централизованно-распределенных ТСС, а также критерии формирования таких систем. Методология решения основана на общих принципах системных исследований в энергетике с использованием технико-экономических моделей функционирования исследуемых систем, закономерностей теории надежности и случайных процессов, методов теории гидравлических цепей и некоторых других методов.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ТСС

Определение границ эффективности централизованного теплоснабжения осуществляется на основе критерия *радиуса эффективного теплоснабжения* (РЭТ). Согласно [10] под РЭТ понимается максимальное расстояние от потребителя до ближайшего ИТ, при превышении которого его подключение к данной ТСС нецелесообразно по причине увеличения затрат в системе. Вопрос определения этого показателя периодически поднимается в научной литературе [11–14]. Большинство существующих методов направлено на оценку интегрального радиуса для каждого ИТ при допущении равномерности распределения тепловых нагрузок (рис. 1), что для реальных систем является практически невыполнимым условием. Альтернативная методика изложена в [15], где приведена более подробная процедура расчета РЭТ по направлениям тепловой сети (ТС).

Основная идея предлагаемого методического подхода заключается в том, что для каждого ИТ системы необходимо проводить расчет РЭТ по каждому направлению тепломагистралей, подключенных к нему. Данный подход является узловым, т.е. предполагает расчет эксплуатационных затрат *для каждого узла* рассматриваемой тепломагистрали.

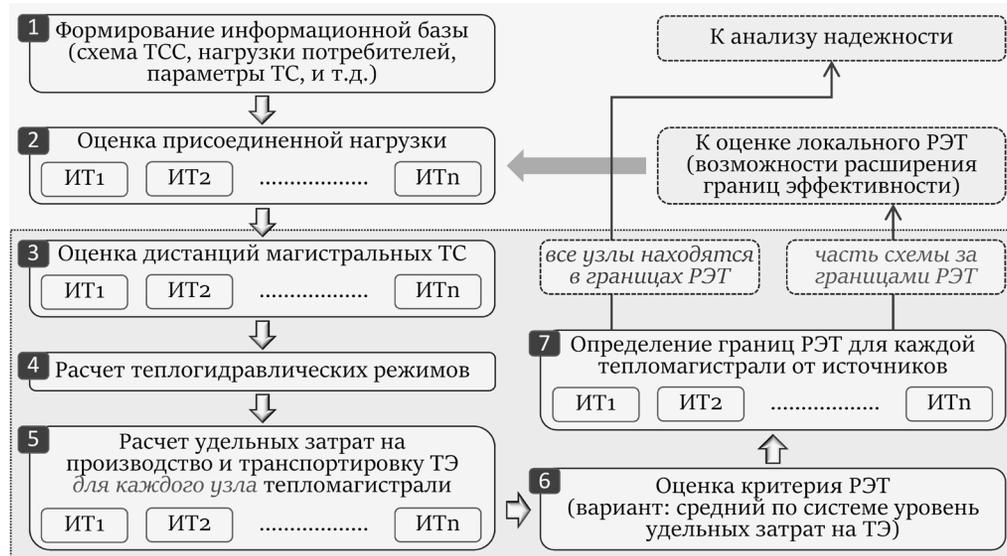
<sup>1</sup> Классификация четырех поколений развития ТСС в определенной мере условна, что связано с непрерывностью самого процесса развития и, как следствие, невозможностью установления четкой границы между системами “соседних” поколений по однозначным признакам. Так, действующие в России ТСС соответствуют 2-му поколению, хотя многие из них являются уникальными по масштабу и структуре, по многим показателям не имеющие аналогов в мире; большинство систем стран Европы, а также новых систем Китая – 3-му поколению (так называемые “скандинавские” ТСС), а к 4-му поколению относят лишь небольшое количество систем некоторых европейских стран (признанный лидер в этой группе – Дания).



**Рис. 1.** Иллюстрация методов определения границ эффективности теплоснабжения в ТСС на основе критерия РЭТ: (а) интегральный подход – для каждого ИТ определен единый радиус из предположения о равномерности распределения тепловой нагрузки; (б) предлагаемый узловой подход – решения получены по узлам каждой магистрали от источников системы.

На рис. 2 представлена схема предлагаемой методики оценки РЭТ, состоящая из следующих основных этапов.

1. Формирование информационной базы для ТСС: фактические зоны действия централизованного теплоснабжения, включая территориальный план, нагрузки потребителей, места расположения, технико-экономические показатели ИТ, протяженность и параметры существующих и новых участков ТС.



**Рис. 2.** Методика определения РЭТ в ТСС.

2. Оценка или уточнение фактических данных по присоединенной тепловой нагрузке для каждого централизованного ИТ. На данном этапе также устанавливается общий тепловой баланс в исследуемой системе.

3. Определение протяженности магистральных ТС для каждого ИТ в соответствии с зонами их действия (по полученным нагрузкам).

4. Расчет теплогидравлических режимов в ТС с применением методов теории гидравлических цепей [16].

5. Расчет удельных затрат на производство и транспортировку тепловой энергии (себестоимости) для каждого узла вдоль каждой магистрали сети от источников по зависимостям для определения затрат на производство и распределение ТЭ, приведенным в работах [1, 17].

6. Оценка критерия для оценки границ РЭТ. Нормативными документами [10, 18] эта граница определена на уровне средних по системе удельных затрат на производство и транспортировку ТЭ (могут использоваться и другие варианты этого критерия).

7. Определение границ РЭТ для каждой магистрали ТС, т.е. подмножества ее узлов, для которых себестоимость производства тепловой энергии не превышает назначенный критерий.

Далее, при условии, что все узлы находятся в границах РЭТ, осуществляется переход к анализу надежности системы (п. 3). В противном случае для частей схемы, выходящих за границы *системного* РЭТ, проводится оценка так называемого *локального* РЭТ [19], в результате которой определяются возможности по расширению границ эффективности теплоснабжения в пределах централизованной системы. Все математические модели, используемые в описанной методике, подробно рассмотрены в публикациях [20–22].

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТСС НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УЗЛОВОГО ПОДХОДА

Теплоснабжение потребителей ТСС должно отвечать не только требованиям экономической эффективности, но и требованиям надежности. Для проверки выполнения этих требований проводится анализ надежности, основанный на определении узловых показателей надежности (ПН). Достаточно масштабный обзор методов исследования надежности ТСС и их подсистем (ИТ и ТС) представлен в книге [23]. На основе этого обзора можно заключить, что существующие методы исследования, а также опыт их практического применения, направлены на проведение оценок надежности отдельно для ИТ и ТС. Разделение задач приводит к получению обособленных результатов, не позволяющих определить уровень надежности теплоснабжения потребителей с учетом совместного вклада каждой подсистемы и их взаимовлияния (эффект эмерджентности при реализации совместных отказов), что в значительной степени проявляется при работе нескольких источников на единую централизованную сеть.

Мы предлагаем комплексный подход, состоящий в определении интегрального воздействия объектов подсистем ТСС на надежность теплоснабжения потребителей. Общая схема методики анализа надежности, основанной на этом подходе, приведена на рис. 3. Комплекс задач анализа надежности и методов их решения разделен на два основных блока (рис. 3): физическое (блок 1) и вероятностное (блок 2)

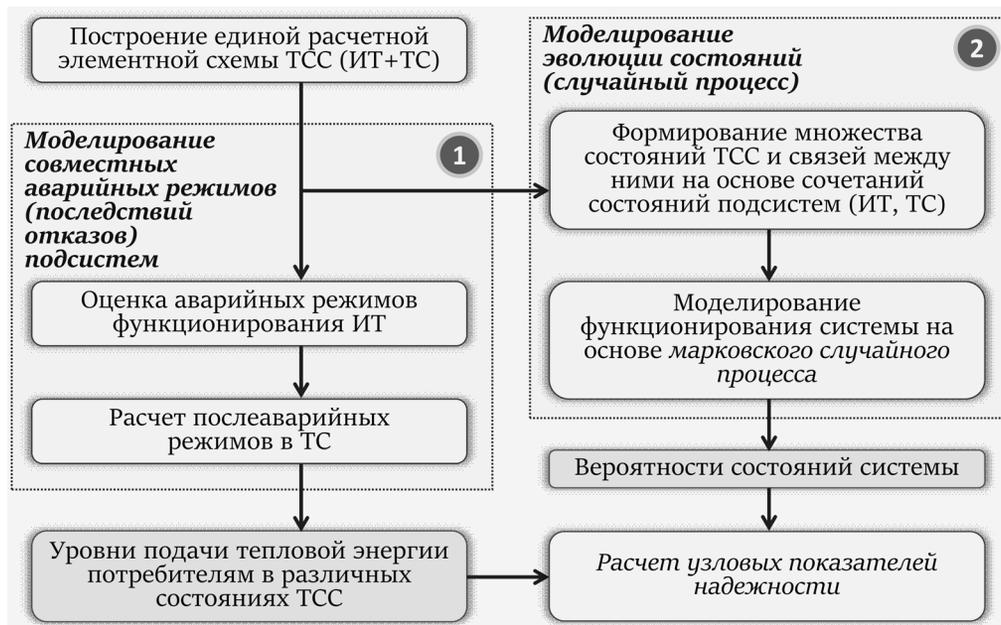


Рис. 3. Основные компоненты комплексного анализа надежности ТСС.

моделирование функционирования системы. Основой для моделирования служит единая элементная расчетная схема ТСС, полученная путем объединения схем ИТ и ТС. Множество состояний ТСС формируется как сочетание состояний его подсистем с учетом технологической возможности их реализации. Оценка вероятностей состояний ТСС производится с учетом заданных параметров надежности элементов (интенсивностей отказов и восстановлений) на основе модели марковского случайного процесса [23, 24]. Оценка аварийных режимов системы заключается в расчете соответствующих теплогидравлических режимов в ТС, моделируемых на основе моделей теории гидравлических цепей [16] с учетом совместимых отказов ИТ. Итоговый результат составляют узловые ПН, рассчитываемые с использованием ранее полученных результатов вероятностного моделирования состояний и оценки соответствующих аварийных режимов (см. рис. 3). Основными ПН являются коэффициент готовности и вероятность безотказной работы, для которых установлены требуемые значения [23, 25]. Методология комплексного анализа надежности ТСС и ее практические приложения подробно изложены в работах [26–30].

#### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТСС

На основе совместного использования методов решения задач анализа эффективности и надежности теплоснабжения построен алгоритм формирования централизованно-распределенных ТСС, который представлен на рис. 4. Методическая процедура содержит 4 основных блока: А – определение границ эффективности централизованного теплоснабжения исходной схемы на основе критерия РЭТ; блок В – анализ надежности в границах эффективности с переходом к блоку синтеза

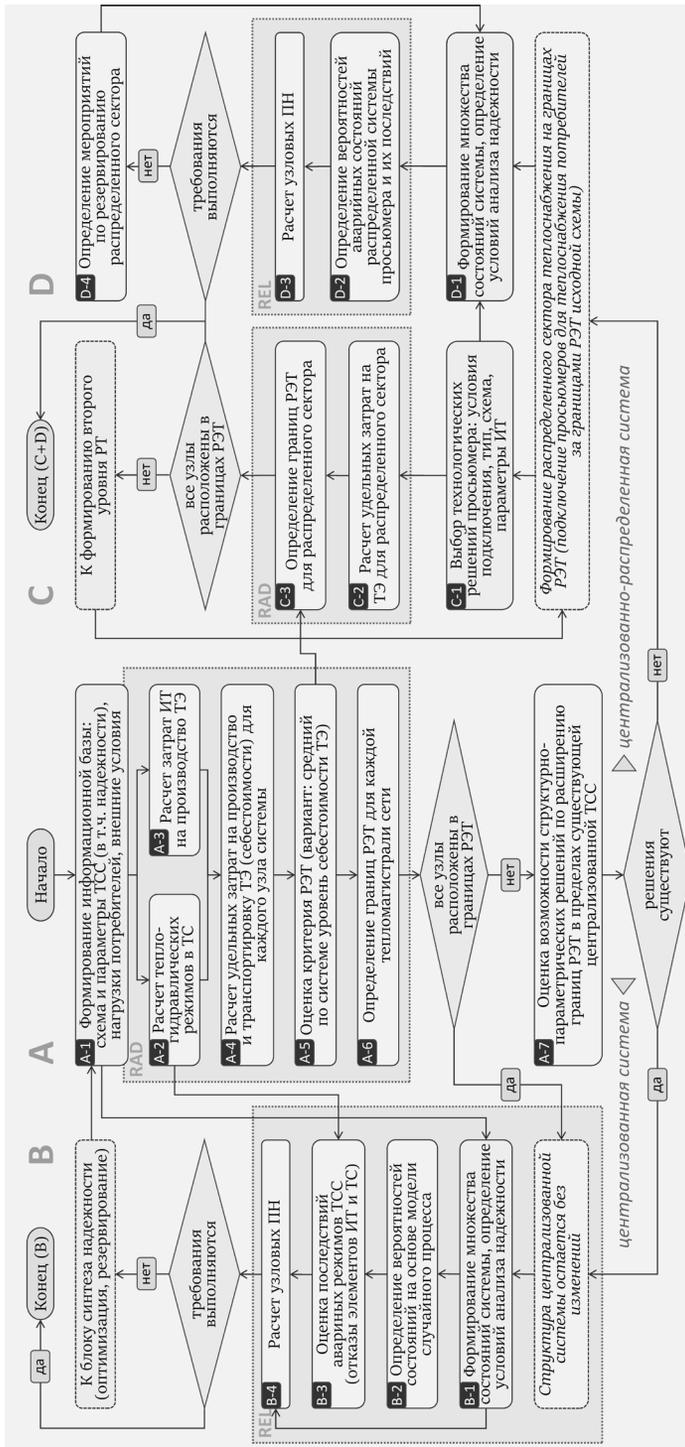
(обеспечения) надежности при необходимости; блок С – определение границ эффективности распределенного сектора теплоснабжения, формируемого из узлов исходной схемы, находящихся за границами РЭТ; блок D – анализ и обеспечение надежности распределенного сектора теплоснабжения на базе просьюмера. В блоках А и С используется методика, изложенная в п. 2, а в блоках В и D (в части анализа надежности) – методические подходы, изложенные в п. 3.

Решение о формировании (локализации) сектора распределенного теплоснабжения принимается на этапе А-7 (рис. 4) при сочетании двух условий: 1) часть схемы ТСС находится за границами РЭТ; 2) нет возможности структурно-параметрических решений по расширению границ РЭТ в пределах существующей централизованной системы. На данном этапе происходит разветвление алгоритма на два типа системы – централизованный и централизованно-распределенный. В последнем случае выделяется несколько групп конечных узлов потребления, предназначенных для подключения к распределенным ИТ. При этом обобщенный потребитель распределенного сектора становится активным потребителем или просьюмером, оставаясь подключенным к централизованной системе, но обладая собственной генерацией [6–9].

Для каждого локализованного распределенного сектора решаются две группы задач, направленных на выполнение требований эффективности и надежности (блоки С и D на рис. 4). После выбора технологических решений просьюмера (тип, схема, параметры ИТ, условия подключения) проводится анализ границ РЭТ внутри его системы. При наличии потребителей, находящихся за этими границами, предполагается их подключение к источнику второго уровня распределенного теплоснабжения: таким образом формируется двухуровневая (в общем случае – многоуровневая) иерархическая структура со своими просьюмерами на каждом уровне генерации. При этом, вследствие перераспределения нагрузки, потребуется корректировка полученных решений по радиусу и надежности для систем более высокого уровня. 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 [31–34].

Параллельно с определением РЭТ для распределенного сектора теплоснабжения проводится анализ надежности, по результатам которого проверяется выполнение соответствующих требований к используемым узловым ПН [23, 25]. Для узлов с нарушением надежности должны быть разработаны мероприятия по ее обеспечению. Учитывая небольшую протяженность сетевой части распределенного сектора (по сравнению с централизованной системой), одним из эффективных решений по повышению надежности представляется резервирование участков ТС путем закольцовывания путей снабжения от источника, что позволяет перераспределять потоки теплоносителя при отказах, обеспечивая аварийную подачу ТЭ. Для выбора оптимальной схемы резервирования ТС рекомендуется использовать соответствующие методы, предложенные в книге [23]. Для централизованной части системы также решается задача анализа надежности, при нарушении которой осуществляется переход к этапу ее оптимизации (синтеза). В качестве возможного их решения могут быть использованы методы оптимизации надежности ТСС, изложенные в работе [30].

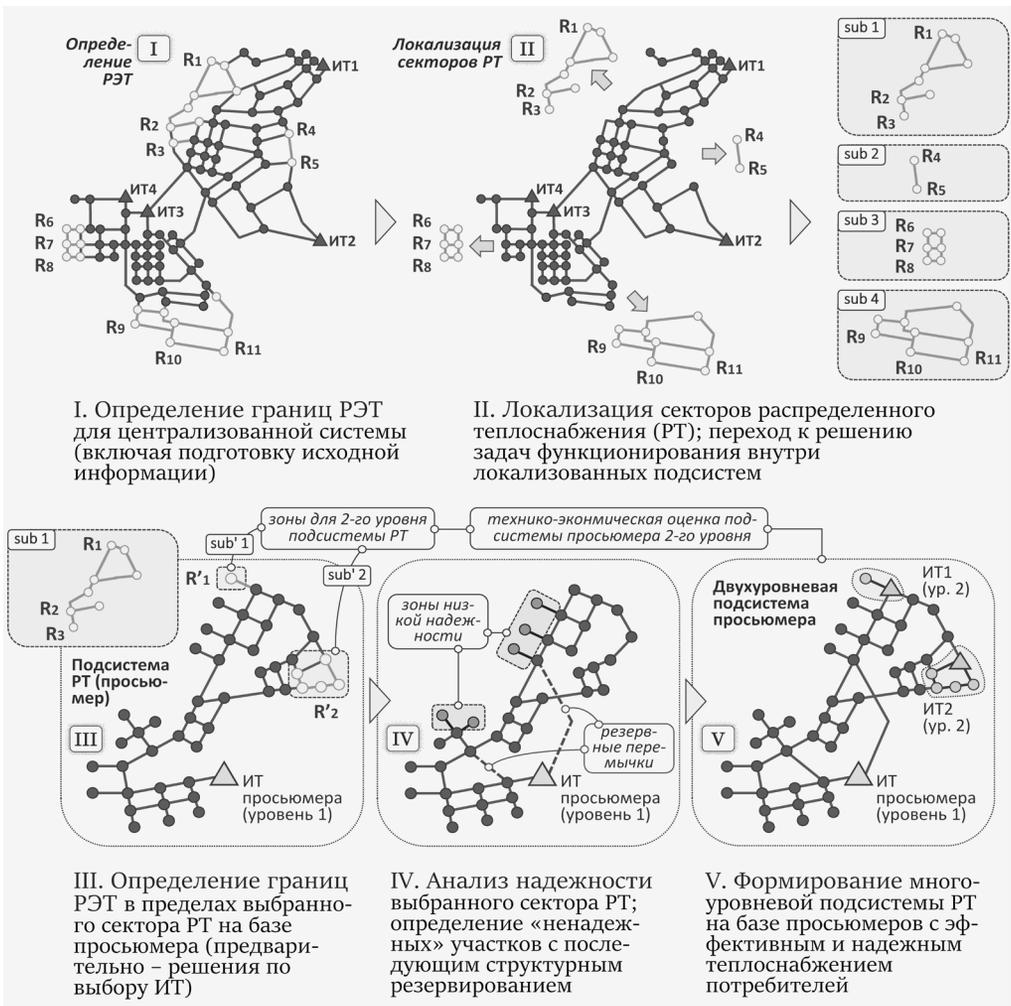
Описанный выше алгоритм в упрощенной форме приведены на рис. 5, который иллюстрирует основные этапы формирования централизованно-распределенной ТСС. На этапе I определяются границы эффективности централизованного теплоснабжения исходной схемы ТСС на основе критерия РЭТ. Далее, на этапе



**Рис. 4.** Алгоритм решения исследуемых задач развития централизованно-распределенных ТСС: блок А – определение границ эффективности централизованного теплоснабжения исходной схемы на основе критерия РЭТ; блок В – анализ надежности в границах эффективности с переходом к блоку синтеза (обеспечения) надежности границ эффективности при необходимости; блок С – определение границ эффективности распределенного сектора теплоснабжения, формируемого из узлов исходной схемы, находящихся за границами РЭТ; блок D – анализ и обеспечение надежности распределенного сектора теплоснабжения на базе просьмера.

II производится локализация секторов распределенного теплоснабжения с переходом к решению задач функционирования внутри локализованных подсистем просьюмеров.

Этап III соответствует определению границ РЭТ в пределах выбранного распределенного сектора на базе просьюмера. При наличии потребителей, находящихся за этими границами, предполагается их подключение к источнику второго уровня РТ: таким образом формируется двухуровневая (в общем случае многоуровневая) иерархическая структура со своими просьюмерами на каждом уровне. На этапе IV решается задача анализа надежности в полученных границах эффективности выбранного сектора с выявлением «ненадежных» узлов и последующим их резервированием. На этапе V формируется итоговая многоуровневая подсистема распределенного



**Рис. 5.** Этапы формирования централизованно-распределенных ТСС с определяющими критериями экономической эффективности (радиус эффективного теплоснабжения) и надежности теплоснабжения (узловые показатели надежности).

теплоснабжения на базе просьюмеров с эффективным и надежным теплоснабжением потребителей. Применяемые методы и модели имеют определенные допущения, а предложенный алгоритм не рассматривается как завершённый этап исследований, но они позволяют в “первом приближении” эффективно решать поставленные методические и практические задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы объединили методические разработки по решению задач обеспечения эффективности и надежности теплоснабжения для формирования подходов и принципов решения соответствующих задач для централизованно-распределенных ТСС. Предложенные методы и модели легли в основу алгоритма трансформации существующих ТСС в централизованно-распределенные системы с имплементацией просьюмеров для покрытия нагрузки, выходящей за границы эффективности централизованного теплоснабжения. Конечно, применяемые методы и модели имеют некоторые ограничения и допущения, а предложенный алгоритм не рассматривается как завершённый этап исследований, но в то же время они позволяют в “первом приближении” эффективно решать поставленные в исследовании задачи (практические приложения в работе не рассматриваются).

Развитие предложенной методологии предполагает решение многих научно-методических и прикладных задач. На данном этапе мы выделяем следующие приоритетные направления.

1. Определение обратной связи решений, полученных на различных уровнях централизованно-распределенной ТСС. Изменение удельных затрат на производство и распределение ТЭ в локализованной системе просьюмера (или сразу нескольких) повлияет на величину общесистемного критерия определения границ РЭТ. При этом чем большая нагрузка будет передана в распределенный сектор, тем более значительным будет отклонение РЭТ от его исходного значения. По скорректированному критерию, в свою очередь, должны быть пересмотрены ранее полученные границы эффективности централизованного теплоснабжения. При корректировке этих границ очевидно потребуются и переоценка технико-экономических показателей секторов распределенного теплоснабжения, которые повторно внесут корректировку в уровень РЭТ. В итоге для получения оптимальной централизованно-распределенной структуры системы потребуется итерационная процедура с “плавающим” критерием РЭТ, реализуемая до некоторого равновесного решения с приемлемой точностью.

2. Разработка методов оптимальной (по экономическому критерию) загрузки централизованных и распределенных источников в соответствии с графиком тепловой нагрузки потребителей на расчетный период (например, отопительный сезон). Полученные решения позволят более корректно определять интегральные (суммарные за рассматриваемый период) эффекты от внедрения просьюмеров. Предполагается, что для поиска равновесного решения между системой и просьюмером будет применен метод двухуровневого программирования, ранее успешно использовавшийся при решении подобных задач.

3. Рассмотрение схем подключения распределенных ИТ к централизованной системе, условий и требований по их надежному функционированию в составе

централизованно-распределенной системы в течение всего расчетного периода с учетом возможных аварийных состояний.

4. Усиление методов обеспечения надежности централизованно-распределенной ТСС: более широкое применения различных способов функционального и структурного резервирования в подсистемах просьюмеров, в том числе с возможностью отпуска тепловой энергии в систему для компенсации аварийных недоотпусков.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987.
2. Lund H., Østergaard P., Chang M., et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 2018, Vol. 164, pp. 147–159.
3. Revesz A., Jones P., Dunham C., et al. Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*, 2020, Vol. 201, 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, Vol. 7(4), pp. 110–118.
5. Pakere I., Gravelsins A., Lauka D., et al. Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system. *Energy*, 2021, Vol. 234, 121245.
6. Brange L., Englund J., Lauenburg P. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study. *Applied Energy*, 2016, Vol. 164, pp. 492–500.
7. Zinsmeister D., Lickleder T., Christange F., et al. A comparison of prosumer system configurations in district heating networks. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7(4), pp. 430–439.
8. Gross M., Karbasi B., Reinert T., et al. Implementing prosumers into heating networks. *Energy*, 2021, Vol. 230, 120844.
9. Pipicello M., Caldera M., Cozzini M., et al. Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Energy*, 2021, Vol. 223, 120036.
10. Федеральный закон от 27.07.2010 №190-ФЗ (ред. от 29.12.2014) “О теплоснабжении”.
11. Якимов Л.К. Предельный радиус действия теплофикации. *Тепло и сила*, 1931, № 9, С. 8–10.
12. Семенов В.Г., Разоренов П.Н. Экспресс-анализ зависимости эффективности транспорта тепла от удалённости потребителей. *Новости теплоснабжения*, 2006, № 6, С. 36–38.
13. Папушкин В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое. *Новости теплоснабжения*, 2010, № 9, С. 44–49.
14. Чичирова Н.Д., Ахметова И.Г. Оценка эффективного радиуса систем централизованного теплоснабжения города Казани. *Труды Академэнерго*, 2016, № 1, С. 89–95.
15. Папушкин В.Н., Полянцев С.О., Щербаков А.П., Храпков А.А. Методика расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения. Электронный ресурс “РосТепло.ру”. URL: [https://www.rosteplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=1601](https://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601) (дата обращения 21.07.2022).
16. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. Москва: Наука, 1985.

17. *Penkovskii A., Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I.* Search for a market equilibrium of Cournot-Nash in the competitive heat market. *Energy*, 2018, Vol. 161, pp. 193–201.
18. Приказ Минэнерго России № 565, Минрегиона России № 667 от 29.12.2012 “Об утверждении методических рекомендаций по разработке схем теплоснабжения”.
19. *Медникова Е.Е., Стенников В.А., Постников И.В.* Разработка методики оценки эффективности присоединения новых потребителей к теплоснабжающей системе. *Промышленная энергетика*, 2018, № 2, С. 13–20.
20. *Стенников В.А., Медникова Е.Е., Постников И.В. и др.* Разработка методики расчета радиуса эффективного теплоснабжения. *Промышленная энергетика*, 2017, № 11, С. 25–32.
21. *Stennikov V., Iakimetc E.* Optimal planning of heat supply systems in urban areas. *Energy*, 2016, Vol. 110, pp. 157–165.
22. *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), pp. 207–221.
23. *Сеннова Е.В., Смирнов А.В., Ионин А.А. и др.* Надежность систем теплоснабжения. Новосибирск: Наука, 2000.
24. *Postnikov I., Stennikov V.* Modifications of probabilistic models of states evolution for reliability analysis of district heating systems. *Energy Reports*, 2020, Vol. 6, pp. 293–298.
25. СНиП 41-02-2003 “Тепловые сети”. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012.
26. *Стенников В.А., Постников И.В.* Комплексный анализ надежности теплоснабжения потребителей. *Известия РАН. Энергетика*, 2011, № 2, С. 107–121.
27. *Stennikov V.A., Postnikov I.V.* Methods for the integrated reliability analysis of heat supply. *Power Technology and Engineering*, 2014, Vol. 47(6), pp. 446–453.
28. *Stennikov V.A., Postnikov I.V.* Methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability. In: “Sustaining power resources through energy optimization and engineering”) by ed. Vasant P. and Voropai N.I. Hershey PA: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2016.
29. *Postnikov I.* Application of the Methods for Comprehensive Reliability Analysis of District Heating Systems. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, Vol. 24(3), pp. 145–162.
30. *Postnikov I., Stennikov V., Mednikova E., Penkovskii A.* Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems. *Applied Energy*, 2018, Vol. 227, pp. 365–374.
31. *Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A.* Prosumer in the district heating systems: Operating and reliability modeling. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 10, pp. 2530–2535.
32. *Penkovskii A., Stennikov V., Kravets A.* Bi-level modeling of district heating systems with prosumers. *Energy Reports*, 2020, Vol. 6(2), pp. 89–95.
33. *Стенников В.А., Постников И.В., Пеньковский А.В.* Методы и модели оптимального управления теплоснабжающими системами с активными потребителями тепловой энергии. *Известия Российской академии наук: Энергетика*, 2021, № 3, С. 12–23.
34. *Стенников В.А., Пеньковский А.В., Кравец А.А.* Двухуровневое моделирование теплоснабжающих систем с учетом активных потребителей. *Промышленная энергетика*, 2021, № 6, С. 10–19.

---

## **Methodological Provisions to the Formation and the Ensuring of Efficiency and Reliability of District-Distributed Heating Systems**

**V. A. Stennikov<sup>a, \*</sup>, I. V. Postnikov<sup>a, \*\*</sup>, E. E. Mednikova<sup>a, \*\*\*</sup>**

*<sup>a</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

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

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

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

This study proposes a methodology for solving two problems of optimal development of district heating systems: analysis of efficiency areas and reliability of heat supply. In solving both problems, we adopt a nodal approach, which allows us to get detailed results that are most suitable to the real-world conditions. Based on the proposed methods and models, we develop an algorithm for transforming existing district heating systems into district-distributed heating systems with prosumers implemented into the network to serve the loads that fall outside the range of efficient operation of a district heating system. Wherein, the distributed sector is formed based on a prosumer that has its own generation, covering part of its own heat load and providing an additional functional and time redundancy for the system. As a result, conclusions and directions for further research are formulated.

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