

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>
УДК 620.98: 658.264

**Проблемы развития
гибридных систем теплоснабжения**

А. В. Седнин¹⁾, К. М. Дюсенов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),
²⁾Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева
(Астана, Республика Казахстан)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье обсуждаются актуальные для стран СНГ проблемы трансформации существующих систем централизованного теплоснабжения в рамках развития тенденций интеграции отраслей энергетики, увеличения объемов потребления вторичных энергоресурсов, «обезуглероживания» промышленности и цифровизации экономики. Рассмотрен опыт западноевропейских стран в части перехода к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений с приданием им свойств гибкости и гибридности, а также свойств «умных энергетических систем». Проанализированы технические аспекты создания гибридных систем управления, приведены обобщенные структурные технологические схемы гибридных систем теплоснабжения и основные мероприятия, реализация которых необходима при их переходе в состояние систем теплоснабжения нового поколения. Отмечается, что гибридность системы теплоснабжения предполагает наличие регенеративных свойств в части производства энергоносителей для использования в смежных системах, в частности это касается водорода. В свою очередь, гибкость системы теплоснабжения во многом реализуется путем развития аккумулятивных свойств, что приводит к инвариантности применения доступных технологий хранения энергии. Утверждается, что, несмотря на постоянно снижающиеся затраты по созданию и эксплуатации системы аккумулирования электроэнергии, системы хранения тепловой энергии остаются приоритетными в теплоснабжении, особенно при использовании возобновляемых источников энергии. Рассмотрен также вопрос применения в системах теплоснабжения электроэнергии как избыточного ресурса объединенных энергетических систем в рамках выравнивания суточного и сезонного графиков потребления энергии. Представлена схема, отражающая технические решения в части применяемого оборудования для осуществления технологии «электроэнергия – теплота». Обсуждается проблема управления системами теплоснабжения нового поколения. Указывается, что для обеспечения требуемых маневренных свойств необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения, исключение одноцелевого подхода в организации гибридных систем, благодаря чему проявляется синергетический эффект с новыми возможностями поиска оптимальных решений, направленных на снижение потребления топлива. Показана необходимость создания межсистемного информационного пространства, которое бы включало в себя создание интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных. Отмечается, что основная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями – достижение динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей,

Адрес для переписки	Address for correspondence
Седнин Алексей Владимирович Белорусский национальный технический университет пр. Независимости, 65/2, 220113, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 397-36-20 Sednin@bntu.by	Sednin Alexei V. Belarusian National Technical University 65/2, Nezavistimosti Ave., 220113, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 17 397-36-20 Sednin@bntu.by

производством тепловой энергии и объемом аккумулирования. Применение гибридных систем в теплоснабжении позволяет решать multifunctional задачу повышения надежности энергоснабжения и устойчивости функционирования энергосистемы, что в первую очередь достигается решением проблемы балансировки мощностей производства и потребления энергии с позиции выравнивания графиков генерации и потребления энергии. Отдельно выделено рассмотрение перспектив применения гибридных систем теплоснабжения в условиях Республики Беларусь. Показана необходимость проведения дополнительных исследований для адаптации известных и разработки новых технических решений в рамках перехода систем теплоснабжения в новое качество.

Ключевые слова: гибкость, гибридность, интеграция, информационное пространство, надежность, модернизация, объект, система, тепловая нагрузка, теплота, теплоснабжение, объединенная электроэнергетическая система, управление, электроэнергия, эффективность

Для цитирования: Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>

Development of Hybrid District Heating Systems

A. V. Sednin¹⁾, K. M. Dyussenov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Eurasian National University named after. L.N. Gumileva (Astana, Republic of Kazakhstan)

Abstract. The article discusses the current problems of transformation of existing district heating systems for the CIS countries within the framework of the development of trends in the integration of energy sectors, increasing the consumption of renewable energy resources, “decarbonizing” industry and digitalization of the economy. The experience of Western European countries in terms of the transition to “4th and 5th generation” district heating systems is considered. The technical aspects of the creation of hybrid control systems are analyzed, generalized structural technological schemes of hybrid district heating systems and the main measures, the implementation of which is necessary during their transition to the state of a new generation of district heating systems, are introduced. It is noted that the hybridity of the district heating system implies the presence of regenerative properties in terms of the production of energy carriers for use in adjacent systems, in particular hydrogen. In turn, the flexibility of the district heating system is largely realized via the development of accumulative properties, which leads to the invariance of the use of available energy storage technologies. It is argued that, despite the constantly decreasing costs of creating and operating an electric power storage system, thermal energy storage systems remain a priority in heat supply, especially when using renewable energy sources. The issue of using electricity in district heating systems as an excess resource of integrated energy systems within the framework of equalizing the daily and seasonal schedule of energy consumption is also considered. Also, a diagram is presented reflecting the technical solutions in terms of the equipment used to implement the “electricity – heat” technology. The problem of management of heat supply systems of a new generation is discussed. It is indicated that in order to ensure the required maneuverable properties of heat supply systems, it is necessary to develop and apply new methods of planning and managing heat supply systems, excluding a single-purpose approach in the organization of hybrid systems, which manifests a synergistic effect with new possibilities for finding optimal solutions aimed at reducing fuel consumption. The need to create an intersystem information space, which would include the creation of intelligent process control systems based on the analysis of large amounts of data, is demonstrated. It is noted that the main goal of operational management of hybrid thermal networks is to achieve a dynamic balance between the required value of the thermal load of consumers, the production of thermal energy and the volume of accumulation. The use of hybrid systems in heat supply makes it possible to solve the multifunctional task of increasing the reliability of energy supply and the stability of the functioning of the energy system, which is primarily achieved by solving the problem of balancing production and energy consumption capacities from the point of alignment of generation and energy consumption schedules. A separate consideration of the prospects for the use of hybrid district

heating systems in the conditions of the Republic of Belarus is highlighted. The need for additional research to adapt known and develop new technical solutions within the framework of the transition of district heating systems to a new quality is shown.

Key words: flexibility, hybridity, integration, information space, reliability, modernization, object, system, heat load, heat, district heating, integrated electric power system, control, electricity, efficiency

For citation: Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian)

Введение

В большинстве стран СНГ и ряде государств Северной и Центральной Европы теплоснабжение городов и населенных пунктов обеспечивается системами теплофикации и системами централизованного теплоснабжения (СЦТ), первые из которых были созданы более ста лет тому назад. Сегодня в странах Западной Европы происходит их очередная трансформация в системы 4-го и 5-го поколений с качественно новыми условиями функционирования [1]. Их основные особенности – низкотемпературное теплоснабжение, широкое использование возобновляемых источников энергии (гибридные системы), доступность тепловых сетей для широкого круга производителей тепловой энергии, использование сбросной теплоты промышленных предприятий и интеграция системы теплоснабжения в общегородские информационные структуры [2–4].

Главным мотивом реализации проектов нового поколения выступает стремление к декорбанизации энергетических систем [5]. При этом критически важным является поиск технических решений для перехода на низкотемпературные режимы работы тепловых сетей. На рис. 1 представлена схема концепции перехода от действующих в странах СНГ СЦТ к перспективным, с полным отказом от использования органического топлива [6].

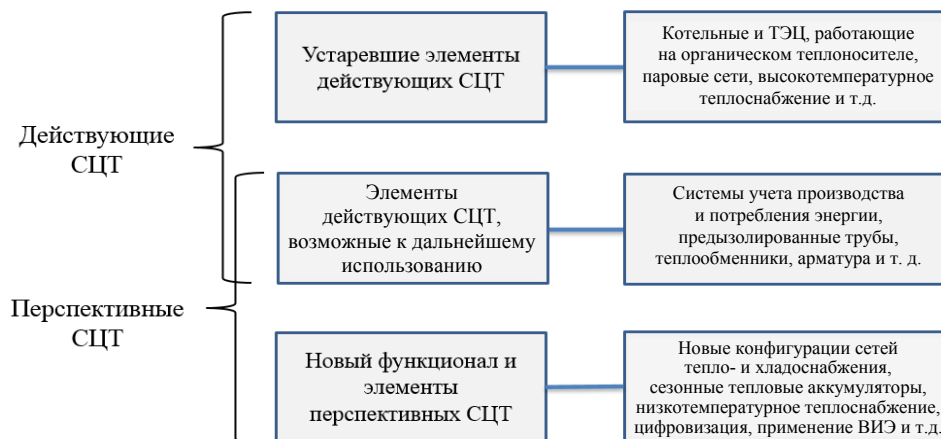


Рис. 1. Концепция перехода к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений [6]

Fig. 1. The transition concept to the 4th and 5th generations of district heating systems [6]

Перспективные системы теплоснабжения представляют собой гибридные системы теплоснабжения, которые предполагают использование двух или более источников тепловой энергии [7], каждый из которых может дополнять друг друга при покрытии как суточных, так и сезонных нагрузок.

В открытом информационном пространстве представлены результаты большого числа исследований, выполненных для различных сочетаний энергогенерирующего оборудования как для крупных СЦТ [8–10], так и для локальных систем теплоснабжения [11, 12]. В большинстве работ допускается распределенная генерация тепловой энергии, под которой понимают производство энергии на объектах уровня распределительной сети или на стороне потребителя, включенного в сеть. В качестве реального примера рассмотрим опыт Дании, который можно считать передовым образцом создания «гибкой» энергосистемы будущего – системы, которая комбинирует различные источники энергии в эффективной и устойчивой конфигурации с системами централизованного теплоснабжения (рис. 2).

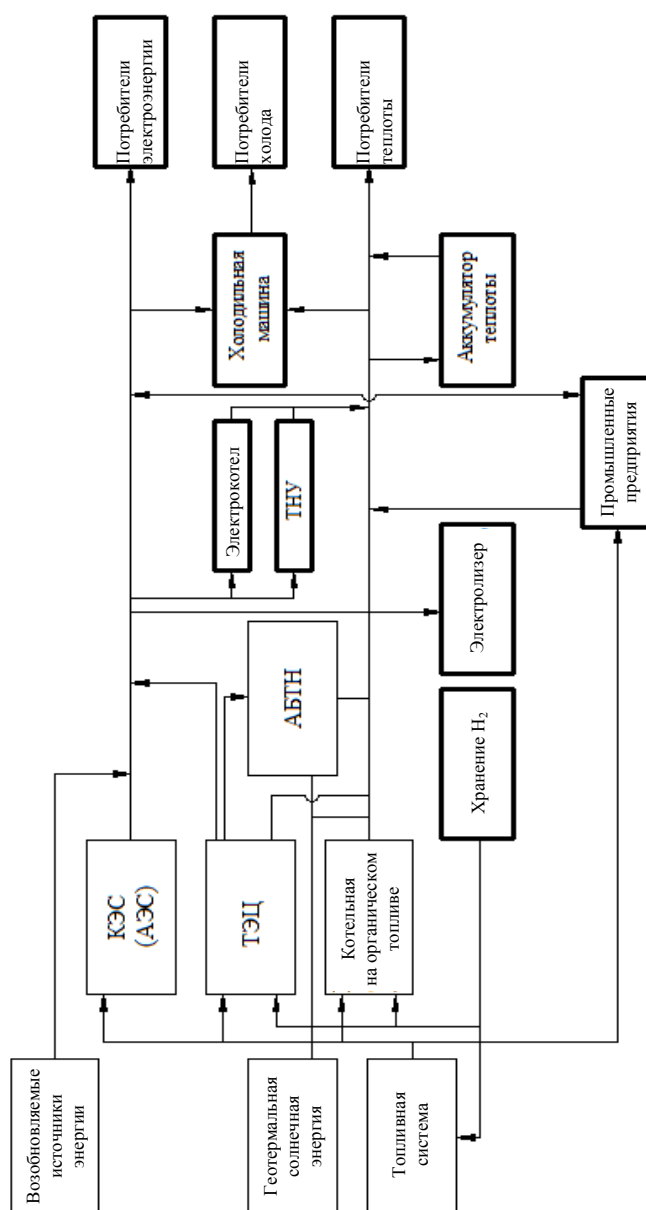


Рис. 2. Концептуальная схема построения умных энергетических систем [13]

Fig. 2. The model of smart energy systems [13]

Технические аспекты создания гибридных систем управления

Априори предполагается, что СЦТ будут играть существенную роль в будущих энергосистемах, особенно из-за необходимости интеграции большого количества возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доля ВИЭ в тепловом балансе различных стран сильно колеблется и зависит от многих факторов [14, 15]. В частности, в Исландии она составляет почти 100 % за счет использования геотермальных источников энергии, в Швеции почти 85 % за счет применения биомассы. В то же время в таких странах, как Россия, Казахстан, Китай, их доля еще незначительна и основным топливом в СЦТ остается каменный уголь. Поэтому понятен интерес европейских ученых к странам, которые разрабатывают технические решения для трансформации этих регионов к широкому внедрению гибридных систем теплоснабжения 4-го и 5-го поколений [16].

Примеры технологических схем гибридных систем теплоснабжения [17] приведены на рис. 3а, б. В рассматриваемых схемах в системах теплоснабжения интегрированы различные традиционные источники тепловой энергии (когенерационные установки, водогрейные котлы) и источники, использующие возобновляемую энергию (тепловые насосные установки (ТНУ), солнечные коллекторы, электродкотлы (ЭК)).

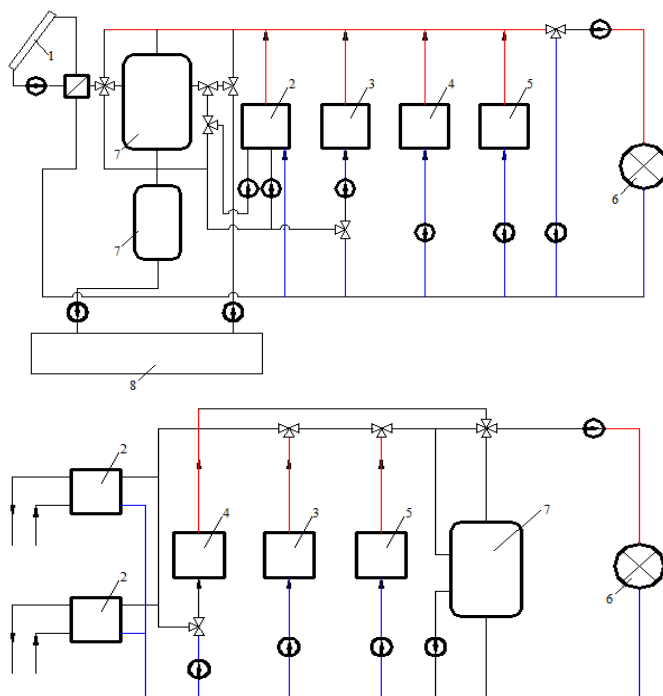


Рис. 3. Примеры технологических схем гибридных систем теплоснабжения:
1 – солнечный коллектор, 2 – компрессионный тепловой насос (геотермальный, воздушный),
3 – электродкотел, 4 – когенерационная установка, 5 – котел, 6 – тепловой потребитель,
7 – аккумулятор тепловой энергии, 8 – сезонный аккумулятор тепловой энергии

Fig. 3. Examples of hybrid district heating systems:
1 – solar collector, 2 – compression heat pump (geothermal, air),
3 – electric boiler, 4 – cogeneration plant, 5 – boiler, 6 – heat demand,
7 – heat storage, 8 – seasonal heat storage

К основным изменениям в технологии работы СЦТ при их переходе к гибридным системам нового поколения относят [18]:

- увеличение доли производства тепловой энергии из ВИЭ;
- масштабное применение аккумулирования тепловой энергии (как краткосрочное, так и длительное (сезонное));
- применение электроэнергии для производства тепловой энергии;
- более тесную интеграцию электрического и теплового секторов;
- использование вторичных энергоресурсов;
- разработку современных низкотемпературных систем теплоснабжения;
- внедрение интеллектуальных цифровых решений.

Очевидно, что внедрение указанных мероприятий гораздо проще для систем теплоснабжения небольшой мощности малых городов, для которых все большую популярность приобретают системы с солнечной и ветровой генерацией, оснащенные системами аккумуляции тепловой энергии [19, 20], а также с использованием биомассы, которую также относят к ВИЭ [21]. Как перспективное направление рассматриваются также системы с генерацией водорода. В соответствии с европейской стратегией «зеленый» водород рассматривается как топливо, которое может заменить природный газ и уголь, в том числе в системах теплоснабжения [22, 23].

Несмотря на постоянно снижающиеся затраты по созданию и эксплуатации системы аккумулирования электроэнергии, системы хранения тепловой энергии остаются приоритетными. Потенциал аккумулирования СЦТ выглядит многообещающим также из-за относительной доступности технологий преобразования электроэнергии в тепловую энергию (электроэнергия в теплоту); электродкотлы, компрессионные тепловые насосы совместно с системами аккумулирования тепловой энергии обеспечивают гибкость при совместной работе электрического и теплового секторов. Электроэнергия может использоваться также на всех уровнях СЦТ: централизованная схема с установкой электродных котлов и ТНУ большой мощности на теплоисточниках, децентрализованная с размещением дополнительного оборудования на объектах тепловой сети (рис. 4).

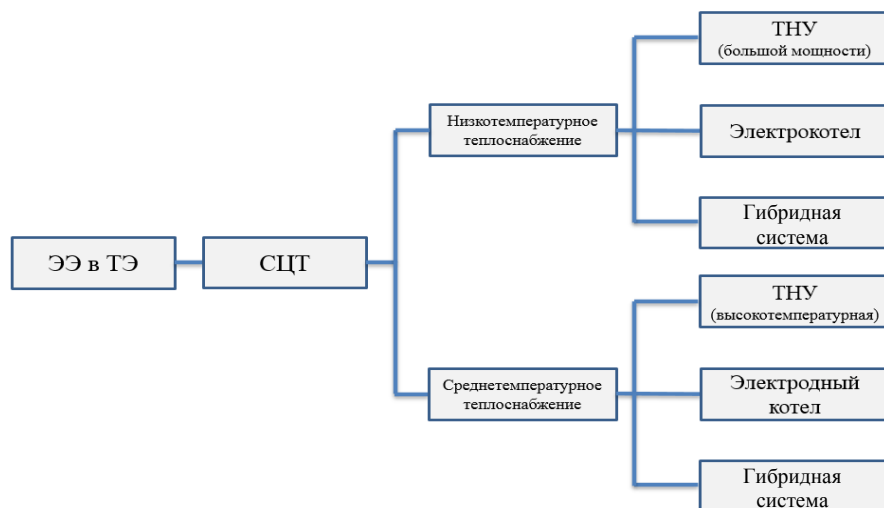


Рис. 4. Варианты применения электроэнергии в системах теплоснабжения

Fig. 4. Options for power-to-heat mode in district heating systems

В исследованиях по эффективности применения ТНУ в СЦТ рассматриваются различные сценарии. Так, в [24] рассмотрена возможность создания гибридной системы теплоснабжения, включающей централизованный источник и локально установленные тепловые насосы, в [25] – модель теплоснабжения г. Хельсинки с дополнительной установкой солнечных коллекторов и ТНУ. Прогнозные результаты исследований показывают, что доля ТЭЦ в тепловом балансе будет уменьшаться с одновременным увеличением доли нагрузки, покрываемой от ТНУ. Одновременно планируется снижение температуры сетевой воды, что в итоге приведет к повышению экономичности системы теплоснабжения на 4–5 %. В [26] рассматривается гибридная система теплоснабжения с сезонным хранением электроэнергии и установкой ТНУ. Показано, что установка ТНУ позволит повысить эффективность схемы на 6–16 % в зависимости от технологии хранения энергии.

Внедрение гибридных систем теплоснабжения с переходом на низкотемпературное теплоснабжение также требует пересмотра подходов к построению структурных схем, особенно если речь идет о модернизации действующих систем. Авторами [27] выполнено обобщение различных возможностей построения тепловых схем гибридных систем теплоснабжения. Рассмотрены шесть вариантов конфигурации тепловых сетей с учетом фактической схемы. Особенное внимание уделяется исследованию каскадных структурных схем, когда новые потребители подключаются к обратному трубопроводу сетевой воды действующих систем [28, 29].

Управление гибридными системами теплоснабжения

Для обеспечения требуемых маневренных свойств энергосистем необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения. В последние годы получила распространение концепция «Умные энергетические системы», основная особенность которой – исключение одноцелевого подхода в организации систем энергоснабжения с созданием гибридных систем. Благодаря этому в результате интеграции энергетических систем проявляется синергетический эффект с новыми возможностями поиска оптимальных организационных и технических решений, направленных на снижение потребления топлива. Применение сторонних источников энергии (СИЭ) может осуществляться как в явном виде, за счет прямого нагрева теплоносителя, так и в косвенном, когда для получения тепловой энергии используется генерируемая на базе СИЭ электроэнергия либо другой промежуточный теплоноситель. Одним из целевых преимуществ гибридных систем теплоснабжения является использование электроэнергии в часы провала суточных графиков электрической нагрузки энергосистемы для покрытия тепловых нагрузок. Концепция создания гибридного теплоснабжения предполагает согласованное автоматическое изменение режимов работы всех источников теплоты, потребителей и элементов тепловой сети в зависимости от внешних факторов, влияющих на потребление тепловой энергии.

Создание гибридных систем теплоснабжения требует решения таких задач, как [31, 32]:

- моделирование и прогнозирование нагрузок потребления тепловой энергии на период 12–48 ч;
 - динамическое моделирование теплового и гидравлического режимов тепловых сетей по фактическим данным измерений;
 - оптимизация уровня давления и температуры в тепловых сетях с целью минимизации тепловых потерь и потерь энергии на транспорт теплоносителя;
 - создание условий для использования в системе теплоснабжения тепловых отходов промышленных предприятий;
 - определение оптимальных мест размещения систем аккумулирования теплоты и условий их эксплуатации;
 - оптимизация совместной загрузки сторонних источников тепловой энергии;
 - создание межсистемного информационного пространства, которое бы включало в себя создание интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных.
- В свою очередь, создание межсистемного информационного пространства позволит осуществить:
- накопление информации о состоянии и режимах работы объектов тепловых сетей;
 - построение математических моделей режимов работы теплогенерирующего оборудования, процессов преобразования, транспорта и потребления тепловой энергии;
 - прогнозирование возможности создания аварийных ситуаций, оценку рисков их возникновения;
 - оптимизацию режимов работы технологического оборудования;
 - полномасштабный учет производства и потребления тепловой энергии.

Операционную модель гибридной системы теплоснабжения можно представить в виде применения разнородных источников тепловой энергии при известной топологии сети. Отличительной чертой систем теплоснабжения городов и населенных пунктов являются значительные колебания нагрузки теплопотребления в зависимости от времени года (отопительный сезон и межотопительный период), метеоусловий местности (в первую очередь, от температуры воздуха), вида тепловой нагрузки. Поэтому основная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями заключается в достижении динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей, производством тепловой энергии на СИЭ и объемом аккумулирования, при этом системы аккумулирования тепловой энергии являются ключевым элементом гибридных систем теплоснабжения [14]. В настоящее время в промышленной эксплуатации находятся как сезонные системы аккумулирования тепловой энергии различного конструктивного исполнения, так и баки-аккумуляторы для меньшего временного периода (обычно суточные или недельные) различных конструктивных типов. При несоответствии топологии тепловой сети всему спектру решаемых технологических задач для обеспечения лучшего баланса между теплоисточниками и потребителями может потребоваться внедрение дополнительных линейных, радиальных и кольцевых элементов в тепловую сеть.

В тактическом плане в периоды с минимальной тепловой нагрузкой тепловая энергия должна быть аккумулирована и потом использована для покрытия пиковых значений, в стратегическом плане эти процессы аккумулирования энергии должны быть подчинены решению системных задач оптимизации функционирования интегрированной системы энергоснабжения. В свою очередь, это требует разработки алгоритмов оптимального управления гибридными системами, которые должны уметь определять и использовать прогнозные значения потребления тепловой энергии, объемов генерации энергии за счет традиционных и «сторонних» ресурсов энергии с учетом возможных отклонений генерации последних.

Для обеспечения экономически обоснованной и успешной интеграции СИЭ в действующие или вновь проектируемые системы теплоснабжения требуется точное прогнозирование тепловой нагрузки потребителей. Как правило, для этого используются климатический прогноз и архивные данные систем учета тепловой нагрузки потребителей. Пример предоставления архивных данных применительно к действующей системе теплоснабжения приведен на рис. 5.

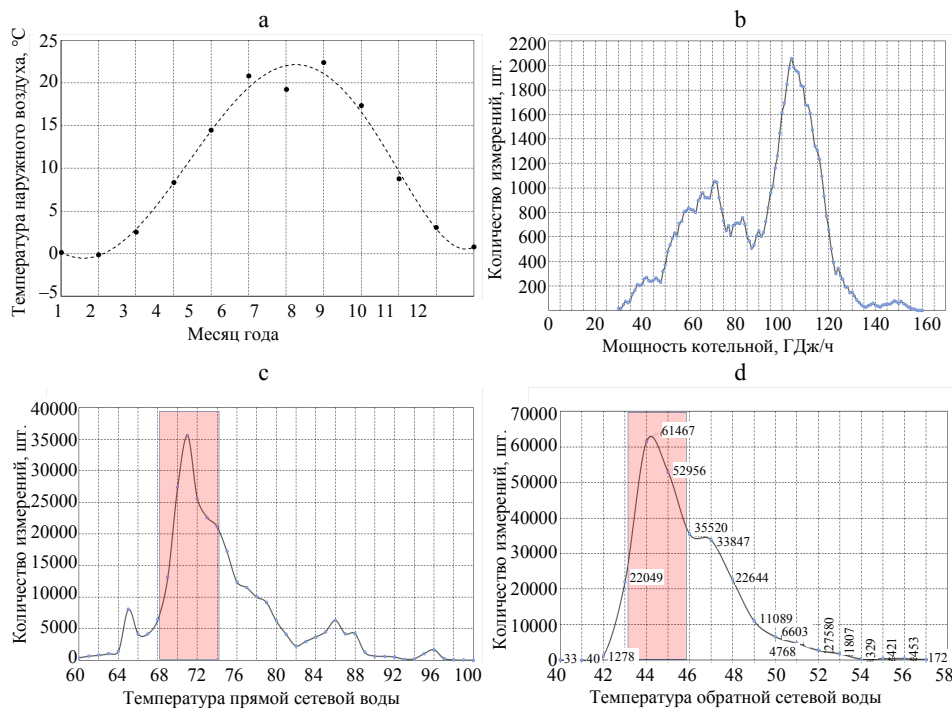


Рис. 5. Анализ фактических архивных данных по работе источника теплоснабжения (в зависимости от частоты регистрации параметров):

а – средняя температура наружного воздуха; б – мощность котельной;
с – температура прямой сетевой воды; д – температура обратной сетевой воды

Fig. 5. Analysis of the archived data of district heating system (depending on the frequency of parameter registration):
а – average outdoor temperature; б – boiler-house load;
с – supply temperature; д – return temperature

Эти параметры являются исходными данными для различных конфигураций гибридных систем теплоснабжения. Тепловая нагрузка потребителей прогнозируется на основании архивных значений в разрезе суточного потребления в зависимости от дня недели и месяца. Блок-схема предполагаемого функционала обработки исходных данных [31, 33] представлена на рис. 6.

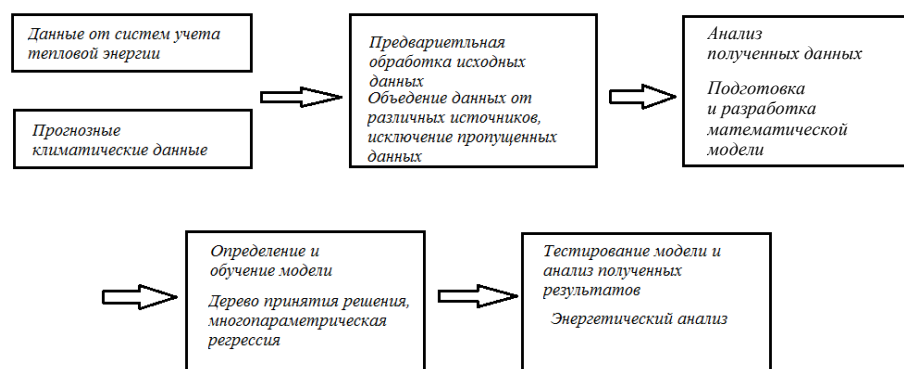


Рис. 6. Основные этапы построения модели прогнозирования тепловой энергии в СТ по архивным данным потребления энергии и климатологии

Fig. 6. The main steps of model construction for thermal load forecasting based on archived data collection on energy consumption and climatic data

Краткосрочный прогноз тепловой нагрузки можно осуществлять детерминированно или предиктивно, используя различные временные отрезки. Детерминированные модели используют сложное моделирование для предсказания физического поведения потребителей тепловой энергии с применением специального программного обеспечения. Возможно моделирование СЦТ с применением архивных данных, когда модели верифицируются за счет архивных значений существующих тепловых сетей. В последние годы находят применение методы искусственного интеллекта, в частности нейросетевой модели.

Перспективы применения гибридных систем теплоснабжения в условиях Республики Беларусь

В областных городах и городах областного подчинения в Республике Беларусь в области теплоснабжения в целом сохранилась структура СЦТ в виде проектных решений по схеме «теплоисточник – ЦТП – теплопотребитель», разработанных еще в бывшем СССР. В последние годы для обеспечения устойчивой работы энергосистемы в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС выполнена программа оснащения теплоисточников (ТЭЦ и районных котельных) электродкотлами совместно с баками-аккумуляторами сетевой воды, что в целом повысило гибкость СЦТ.

Технические решения, разработанные в странах Западной Европы по созданию гибридных систем теплоснабжения по согласованию электрического и теплового графика выработки и потребления энергии, оптимизации

загрузки оборудования электрических сетей, не могут, как правило, напрямую быть рекомендованы к внедрению в Республике Беларусь и требуют адаптации к нашим условиям. Одним из направлений является развитие проведенных ранее исследований по разработке технологий создания гибридных тепловых пунктов [34] в системах теплоснабжения, которые позволили бы эффективно решать задачи по выравниванию графиков электрической и тепловой нагрузки, снижению уровня температур обратной сетевой воды (рис. 7), который, на наш взгляд, сегодня имеет завышенные значения.

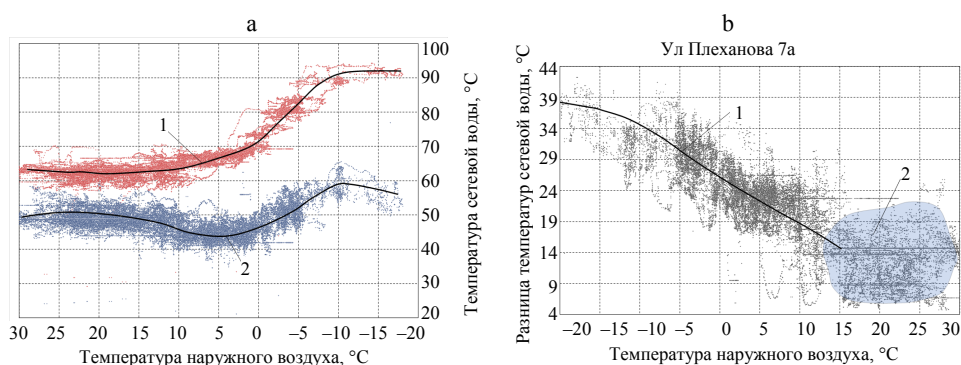


Рис. 7. Фактический температурный график (а) и разница температур прямой и обратной сетевой воды (б) за 2023 г. (на примере ЦТП СЦТ г. Минска)

Fig. 7. The actual temperature graph (a) and the temperature difference signature (b) for 2023 (based on the example of the central heating station in Minsk)

Применение гибридных схем также целесообразно рассмотреть для небольших населенных пунктов, включая объекты сельской местности, по критериям надежности и декарбонизации с использованием полного спектра доступных энергоресурсов [23].

ВЫВОДЫ

1. Учитывая значимость отрасли теплоснабжения для большинства стран СНГ, в современных условиях является актуальным исследование проблемы трансформации существующих систем централизованного теплоснабжения в рамках развития тенденций интеграции отраслей энергетики, увеличения объемов потребления вторичных энергоресурсов, «обезуглероживания» промышленности и цифровизации экономики. Применение гибридных систем в теплоснабжении позволяет решать многофункциональную задачу повышения надежности энергоснабжения и устойчивости функционирования энергосистемы, что, в первую очередь, достигается решением проблемы балансировки мощностей производства и потребления энергии с позиции выравнивания графиков генерации и потребления энергии. Имеющийся опыт ряда западноевропейских стран в части перехода

к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений не может быть использован при модернизации без адаптации и учета национальных условий.

2. Основным в концепции перехода к системам теплоснабжения нового поколения является придание им свойств гибкости и гибридности, что невозможно без развития информационности систем теплоснабжения. Для обеспечения требуемых маневренных свойств необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения. Главная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями – достижение динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей, производством тепловой энергии и объемом аккумулирования, при этом системы аккумулирования тепловой энергии являются ключевым элементом гибридных систем теплоснабжения. Создание межсистемного информационного пространства предполагает разработку интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных.

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор T22УЗБ-052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165, Part A. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. The Status of 4th Generation District Heating: Research and Results / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>.
3. Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2021. Vol. 227. P. 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.
4. Modelling of Waste Heat Integration Into an Existing District Heating Network Operating at Different Supply Temperatures / J. Stock [et al.] // *Smart Energy*. 2023. Vol. 10. P. 100104. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100104>.
5. Latõšov, E. CO₂ Emission Intensity of the Estonian DH sector / E. Latõšov, S. Umbleja, A. Volkova // *Smart Energy*. 2022. Vol. 6. P. 100070. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100070>.
6. Vocabulary for the Fourth Generation of District Heating and Cooling / M. Sulzer [et al.] // *Smart Energy*. 2021. Vol. 1. P. 100003. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100003>.
7. Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: a Case Study of a Small Town in Croatia / R. Mikulandric [et al.] // *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2015. Vol. 3, Iss. 3. P. 282–302. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0022>.
8. Rămă, M. Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System / M. Rămă, M. Wahlroos // *Energy*. 2018. Vol. 154. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
9. Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites / M. Schindler [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 2120. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.
10. Reiter, P. BIG Solar Graz: Solar District Heating in Graz – 500,000 m² for 20% Solar Fraction / P. Reiter, H. Poier, C. Holter // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 91. P. 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.204>.

11. Теплоснабжение дома от теплонасосной системы, использующей возобновляемые источники энергии / В. Харченко [и др.] // Научные труды Литовской академии прикладных наук. 2012. № 7. С. 45–52.
12. Domestic Heating With Compact Combination Hybrids (Gas Boiler and Heat Pump): A Simple English Stock Model of Different Heating System Scenarios / G. Bennett // Building Services Engineering Research and Technology. 2021. Vol. 43, No 2. P. 143–159. <https://doi.org/10.1177/01436244211040449>.
13. EnergyPLAN – Advanced analysis of Smart Energy Systems, Smart / H. Lund [et al.] // Smart Energy. 2021. Vol. 1. P. 100007. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
14. Role of Sustainable Heat Sources in Transition Towards Fourth Generation District Heating – A review / A. M. Jodeiri [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 158. P. 112156. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112156>.
15. Talarek, K. Challenges for District Heating in Poland / K. Talarek, A. Knitter-Piątkowska, T. Garbowski // Discover Energy. 2023. Vol. 3, No 5. <https://doi.org/10.1007/s43937-023-00019-z>.
16. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids Into Future Sustainable Energy Systems / H. Lund [et al.] // Energy. 2014. Vol. 68, P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
17. Large-Scale Solar Thermal Systems in Leading Countries: A Review and Comparative Study of Denmark, China, Germany and Austria / D. Tschopp [et al.] // Applied Energy. 2020. Vol. 270. P. 114997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114997>.
18. Fifth Generation District Heating and Cooling: A Comprehensive Survey / L. Minh Dang [et al.] // Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 1723–1741. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.037>.
19. Overview of Solar Photovoltaic Applications for District Heating and Cooling / S. Sukumaran, J. Laht, A. Volkova // Environmental and Climate Technologies. 2023. Vol. 27, No 1. P. 964–979. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0070>.
20. Kubiński, K. Dynamic Model of Solar Heating Plant with Seasonal Thermal Energy Storage / K. Kubiński, Ł. Szablowski // Renewable Energy. 2020. Vol. 145. P. 2025–2033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.120>.
21. Comprehensive Analysis of hot Water Tank Sizing for a Hybrid Solar-Biomass District Heating and cooling / Juan José Roncal-Casano [et al.] // Results in Engineering. 2023. Vol. 18. P. 101160. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101160>.
22. Gudmundsson, O. Source-to-sink Efficiency of Blue and Green District Heating and Hydrogen-based Heat Supply Systems / O. Gudmundsson, J. E. Thorsen // Smart Energy. 2022. Vol. 6. P. 100071. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100071>.
23. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. P. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
24. Pesola, A. Cost-Optimization Model to Design and Operate Hybrid Heating Systems – Case Study of District Heating System with Decentralized Heat Pumps in Finland / A. Pesola // Energy. 2023. Vol. 281. P. 128241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128241>.
25. Rămă, M. Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System / M. Rămă, M. Wahlroos // Energy. 2018. Vol. 154. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
26. Tosatto, A. Simulation-Based Performance Evaluation of Large-Scale Thermal Energy Storage Coupled with Heat Pump in District Heating Systems / A. Tosatto, A. Dahash, F. Ochs // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 61. P. 106721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106721>.
27. Werner, S. Network Configurations for Implemented Low-Temperature District Heating / S. Werner // Energy. 2022. Vol. 254, Part B. P. 124091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124091>.
28. Cascade Sub-Low Temperature District Heating Networks in Existing District Heating Systems / A. Volkova [et al.] // Smart Energy. 2022. Vol. 5. P. 100064. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100064>.

29. A Review of Low-Temperature Sub-Networks in Existing District Heating Networks: Examples, Conditions, Replicability / S. Puschnigg [et al.] // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7, Suppl. 4. P. 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.044>.
30. Современное состояние, тенденции и задачи интеллектуализации систем теплоснабжения (обзор) / Н. Н. Новицкий [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2022. № 5. С. 65–83. <https://doi.org/10.1134/S0040363622040051>.
31. Sednin, A. V. Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, No 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
32. Fault and Anomaly Detection in District Heating Substations: A Survey on Methodology and Data sets / M. Neumayer [et al.] // *Energy*. 2023. Vol. 276. 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>.
33. Intelligent Approaches to Fault Detection and Diagnosis in District Heating: Current Trends, Challenges, and Opportunities / J. van Dreven [et al.] // *Electronics*. 2023. Vol. 12, No 6. P. 1448. <https://doi.org/10.3390/electronics12061448>.
34. Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Ч. 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / А. В. Седнин, М. И. Позднякова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.

Поступила 26.12.2023 Подписана в печать 28.02.2023 Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen, B. V. (2018). Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. *Energy*, 165 (Part A), 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Lund H., Østergaard P. A., Chang M., Werner S., Svendsen S., Sorknæs P., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mortensen B. O. G., Mathiesen B. V., Bojesen C., Duic N., Zhang X., Möller B. (2018) The Status of 4th Generation District Heating: Research and Results. *Energy*, 164, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.20>.
3. Lund H., Østergaard P. A., Nielsen T. B., Werner S., Thorsen J. E., Gudmundsson O., Arabkoohsar A., Mathiesen B. V. (2021) Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating. *Energy*, 227, 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.
4. Stock J., Arjuna F., Xhonneux A., Müller D. (2023) Modelling of Waste Heat Integration Into an Existing District Heating Network Operating at Different Supply Temperatures. *Smart Energy*, 10, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100104>.
5. Latõšov E., Umbleja S., Volkova A. (2022) CO2 Emission Intensity of the Estonian DH Sector. *Smart Energy*, 6, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100070>.
6. Sulzer M., Werner S., Mennel S., Wetter M. (2021) Vocabulary for the Fourth Generation of District Heating and Cooling. *Smart Energy*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100003>.
7. Mikulandrić R., Krajacic G., Duic N., Khavin G., Lund H., Mathiesen B. (2015). Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: a Case Study of a Small Town in Croatia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3 (3), 282–302. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0022>.
8. Rämä M., Wahlroos M. (2018) Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System. *Energy*, 154, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
9. Schindler M., Gnam L., Puchegger M., Medwenitsch K., Jasek P. (2023) Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites. *Energies*, 16, 2120. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.

10. Reiter P., Poier H., Holter Ch. (2016) BIG Solar Graz: Solar District Heating in Graz – 500.000 m² for 20 % Solar Fraction. *Energy Procedia*, 91, 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.204>.
11. Kharchenko V., Chemekov V., Tikhonov P., Adomavicius V. (2012) Heat Supply of the House from a Heat Pump System Using Renewable Energy Sources. *Scientific Proceedings of the Lithuanian Academy of Applied Sciences*, (7), 45–52 (in Russian).
12. Bennett G., Watson S., Oreszczyń T. (2021). Domestic Heating with Compact Combination Hybrids (Gas Boiler and Heat Pump): A Simple English Stock Model of Different Heating System Scenarios. *Building Services Engineering Research and Technology*, 43 (2), 143–159. <https://doi.org/10.1177/01436244211040449>.
13. Lund H., Thellufsen J. Z., Østergaard P. A., Sorknæs P., Skov I. R., Mathiesen B. V. (2021) EnergyPLAN – Advanced Analysis of Smart Energy Systems. *Smart Energy*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
14. Jodeiri A. M., Goldsworthy M. J., Buffa S., Cozzini M. (2022) Role of Sustainable Heat Sources in Transition Towards Fourth Generation District Heating – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112156. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112156>.
15. Talarek K., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. (2023) Challenges for District Heating in Poland. *Discover Energy*, 3 (5). <https://doi.org/10.1007/s43937-023-00019-z>.
16. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. (2014) 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
17. Tschopp D., Tian Z., Berberich M., Fan J., Perers B., Furbo S. (2020). Large-Scale Solar Thermal Systems in Leading Countries: A Review and Comparative Study of Denmark, China, Germany and Austria. *Applied Energy*, 270, 114997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114997>.
18. Minh Dang L., Le Quan Nguyen, Junyoung Nam, Tan N. Nguyen, Sujin Lee, Hyoung-Kyu Song, Hyeonjoon Moon (2024) Fifth Generation District Heating and Cooling: A Comprehensive Survey. *Energy Reports*, 11, 1723–1741. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.037>.
19. Sukumaran S., Laht J., Volkova A. (2023). Overview of Solar Photovoltaic Applications for District Heating and Cooling. *Environmental and Climate Technologies*, 27 (1), 964–979. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0070>.
20. Kubiński K., Szablowski Ł. (2020) Dynamic Model of Solar Heating Plant with Seasonal Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, 145, 2025–2033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.120>.
21. Roncal-Casano J. J., Rodriguez-Martín J., Abánades A., Muñoz-Antón J., Gurruchaga I., Castellví D. G. (2023) Comprehensive Analysis of Hot Water Tank Sizing for a Hybrid Solar-biomass District Heating and Cooling. *Results in Engineering*, 18, 101160. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101160>.
22. Gudmundsson O., Jan Eric Thorsen J. E. (2022) Source-to-Sink Efficiency of Blue and Green District Heating and Hydrogen-Based Heat Supply Systems. *Smart Energy*, 6, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100071>.
23. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2023) Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373> (in Russian).
24. Pesola A. (2023) Cost-Optimization Model to Design and Operate Hybrid Heating Systems – Case Study of District Heating System with Decentralized Heat Pumps in Finland. *Energy*, 281, 128241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128241>.
25. Rămă M., Wahlroos M. (2018) Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System. *Energy*, 154, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.

26. Tosatto A., Dahash A., Ochs F. (2023) Simulation-Based Performance Evaluation of Large-scale Thermal Energy Storage Coupled with Heat Pump in District Heating Systems. *Journal of Energy Storage*, 61, 106721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106721>.
27. Werner S. (2022) Network Configurations for Implemented Low-Temperature District Heating. *Energy*, 254 (Part B), 124091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124091>.
28. Volkova A., Reuter S., Puschnigg S., Kauko H., Schmidt R.-R., Leitner B., Moser S. (2022) Cascade Sub-Low Temperature District Heating Networks in Existing District Heating Systems. *Smart Energy*, 5, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100064>.
29. Puschnigg S., Jauschnik G., Moser S., Volkova A., Matthias L. (2021) A Review of Low-Temperature Sub-Networks in Existing District Heating Networks: Examples, Conditions, Replicability. *Energy Reports*, 7 (4), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.044>.
30. Novitskii N. N., Shalaginova Z. I., Alekseev A. V., Grebneva O. A., Tokarev V. V., Lutsenko A. V., Vanteeva O. V. (2022) Intellectualization of Heat-Supply Systems: Current State, Trends and Tasks (a Review). *Thermal Engineering*, 5, 65–83. <https://doi.org/10.1134/S0040363622040051> (in Russian).
31. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
32. Neumayer M., Stecher D., Grimm S., Maier A., Bucker D., Schmidt J. (2023) Fault and Anomaly Detection in District Heating Substations: A Survey on Methodology and Data Sets. *Energy*, 276, 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>.
33. van Dreven J., Boeva V., Abghari S., Grahm H., Al Koussa J., Motoasca E. (2023) Intelligent Approaches to Fault Detection and Diagnosis in District Heating: Current Trends, Challenges, and Opportunities. *Electronics*, 12 (6), 1448. <https://doi.org/10.3390/electronics12061448>.
34. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1. Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).

Received: 26 December 2023 Accepted: 28 February 2023 Published online: 29 March 2024