

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>

УДК 620.98:658.264

Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов

Часть 1

Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов

А. В. Седнин¹⁾, М. И. Позднякова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье обсуждаются обстоятельства и технические решения, способствующие интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов в рамках профицита электрогенерирующих мощностей, возникающего из-за несбалансированности развития генерации и потребления энергии, стохастичности процессов развития рыночной экономики, переноса энергоемких промышленных производств в другие страны, стремления к диверсификации топливных энергоресурсов, увлечения строительством энергоисточников на альтернативные энергоресурсы в противовес объектам традиционной энергетики, без учета всех сторон взаимодействия первых с окружающей средой и др. В системах централизованного теплоснабжения электрических и тепловых сетей городских микрорайонов достигается применение гибридных тепловых пунктов, которые в отличие от типовых решений оснащаются электродкотлами, тепловыми аккумуляторами и тепловыми насосами. По времени использования генерирующих мощностей предпочтение следует отдавать вариантам по покрытию горячеводной нагрузки. В расчете по средней суточной нагрузке время использования мощности в этом случае лежит в пределах 6000–6500 ч/год. При выборе мощности оборудования следует учитывать, что суточная нагрузка горячего водоснабжения крайне неравномерна и зависит также от дня недели, при этом максимальная нагрузка превышает среднесуточную в 2,5–3 раза. При интеграции систем электро- и теплоснабжения целесообразно рассматривать варианты только ночного потребления электроэнергии или ночного потребления плюс потребление в часы дневных провалов графика электропотребления. Если при новом строительстве мощность электрической сети может варьироваться в зависимости от выбранного варианта, то при модернизации системы теплоснабжения задача решается при наличии ограничения по доступной электрической мощности. Поэтому отдельным вопросом является определение этих ограничений. По сравнению с прямым потреблением электроэнергии на нужды теплоснабжения, которое априори является энергетически и экономически малоэффективным, 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.

Ключевые слова: интеграция, нагрузка, надежность, модернизация, строительство, тепловой пункт, теплоснабжение, электроэнергетическая система, энергосистема, эффективность

Для цитирования: Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Часть 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>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

Sednin Alexei V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavistimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 397-36-20
Sednin@bntu.by

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

A. V. Sednin¹⁾, M. I. Pozdnyakova¹⁾

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

Abstract. The paper discusses the circumstances and technical solutions that contribute to the integration of electrical and thermal networks of urban neighborhoods within the framework of a surplus of electricity generating capacities arising from the imbalance in the development of energy generation and consumption, stochastic processes of market economy development, the transfer of energy-intensive industrial production to other countries, the desire to diversify fuel energy resources, passion for the construction of energy sources for alternative energy resources in counterbalance to traditional energy facilities without taking into account all aspects of the interaction of the former with the environment, etc. With regard to district heating systems of electrical and thermal networks of urban neighborhoods, the use of hybrid heating points is achieved, which, unlike standard solutions, are equipped with electric boilers, thermal accumulators and heat pumps. According to the time of use of generating capacities, preference should be given to options for covering the hot-water load. Based on the average daily load, the power usage time in this case lies in the range of 6000–6500 hours / year. When choosing the capacity of the equipment, it should be borne in mind that the daily load of hot water supply is extremely uneven and also depends on the day of the week, while the maximum load exceeds the average daily by 2.5 – 3.0 times. When integrating electricity and heat supply systems, it is advisable to consider options for only night-time electricity consumption or night-time consumption plus consumption during the hours of daytime failures of the electricity consumption schedule. If during the new construction the power of the electrical network may vary depending on the selected option, then during the modernization of the heat supply system, the problem is solved if there is a limitation on the available electrical power. Therefore, the definition of these restrictions is a separate issue. In comparison with the direct consumption of electricity for the needs of heat supply, which is a priori energetically and economically inefficient, the use of hybrid systems in heat supply allows us to solve the multifunctional task of increasing the reliability of energy supply and the stability of the functioning of the power system, which is primarily achieved by solving the problem of balancing the capacity of production and energy consumption from the position of aligning schedules of energy generation and consumption.

Keywords: integration, load, reliability, modernization, construction, heat point, heat supply, electrical power system, energy system efficiency

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>

Введение

Модель устойчивого развития общества, как один из основных современных трендов, в своем составе предполагает ускорение научно-технологического прогресса и рост масштабов цифровизации экономики. В рамках этих изменений проявляется тенденция интеграции смежных систем городской инфраструктуры [1, 2]. Интеграция технических систем жизнеобеспечения является также актуальной ввиду перспективы решения задач по повышению качества и надежности оказания услуг и минимизации затрат как на создание, так и на эксплуатацию систем жизнеобеспечения [3].

В статье рассматриваются техническая возможность и возникающие проблемы при интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов в рамках профицита электрогенерирующих мощностей вследствие несбалансированности развития объектов генерации и потребления энергии, стохастичности процессов развития рыночной экономики, переноса энергоемких промышленных производств в другие страны, стремления к диверсификации топливных энергоресурсов, увлечения массовым строительством энергоисточников на возобновляемые энергоресурсы [4] в противовес объектам традиционной энергетики, без учета всех сторон взаимодействия первых с окружающей средой и др. В Республике Беларусь основной причиной проявления такой ситуации стало отставание темпов строительства промышленно-гражданской инфраструктуры (основных потребителей электроэнергии) от темпов строительства и модернизации электростанций, что стимулировало разработку и внедрение инновационных технических решений в области повышения спроса на электроэнергию во всех отраслях экономики, включая социальную и жилищно-бытовую сферы. Одним из реализуемых мероприятий стало расширение применения электроэнергии в теплоснабжении.

Стоит отметить, что переход к технологиям «электроэнергия-в-теплоту», таким как электродкотлы, тепловые насосы совместно с системами аккумулирования тепловой энергии, рассматривается во многих странах как техническое решение, которое обеспечит гибкость и управляемость будущих энергосистем [5–7].

В Республике Беларусь предпочтение отдано вариантам с установкой электродных водогрейных котлов на действующих электростанциях и котельных, а также строительству новых жилых домов с полным покрытием энергетических затрат электроэнергией [8].

Говоря об экономической целесообразности применения электроэнергии в области теплоснабжения, в качестве основного плюса следует отметить повышение надежности и устойчивости функционирования энергосистемы, что, в первую очередь, достигается решением проблемы балансировки мощностей производства и потребления энергии с позиции выравнивания графиков генерации последней, так как простое увеличение потребления электроэнергии на нужды теплоснабжения (низкопотенциального теплопотребителя) априори не является энергетически и экономически эффективным [9]. Поэтому альтернативой и дополнением вышеуказанных мероприятий, на наш взгляд, является возможность повышения электропотребления в действующих системах централизованного теплоснабже-

ния (СЦТ) в рамках развития интеграционных процессов в энергетике путем применения гибридных тепловых пунктов (ТП), обладающих возможностью использования для нужд теплоснабжения двух или более энергоносителей [10, 11]. Очевидно, что потенциал возможных объемов внедрения данного технического решения, а следовательно, потенциал возможных объемов потребления электроэнергии на нужды теплоснабжения гораздо больше при модернизации объектов существующей застройки городской территории с СЦТ.

Анализ предпроектной информации

Так как речь идет о существующих системах жизнеобеспечения, на первый план выходят вопросы определения возможного и допустимого потенциала использования электричества для нужд теплоснабжения без значительных капитальных затрат в модернизацию электроэнергетической инфраструктуры, а именно:

- наличия «свободных» мощностей электрических сетей для организации доставки электроэнергии теплопотребителю в рамках сложившихся и перспективных суточных графиков электропотребления;

- разработки технических решений по модернизации тепловых пунктов с целью придания им свойств гибридности (в части возможности потребления как тепловой, так и электрической энергии);

- анализа фактических режимов работы тепловых пунктов на базе архивных данных систем диспетчеризации и автоматизированной системы управления (при наличии) [12, 13];

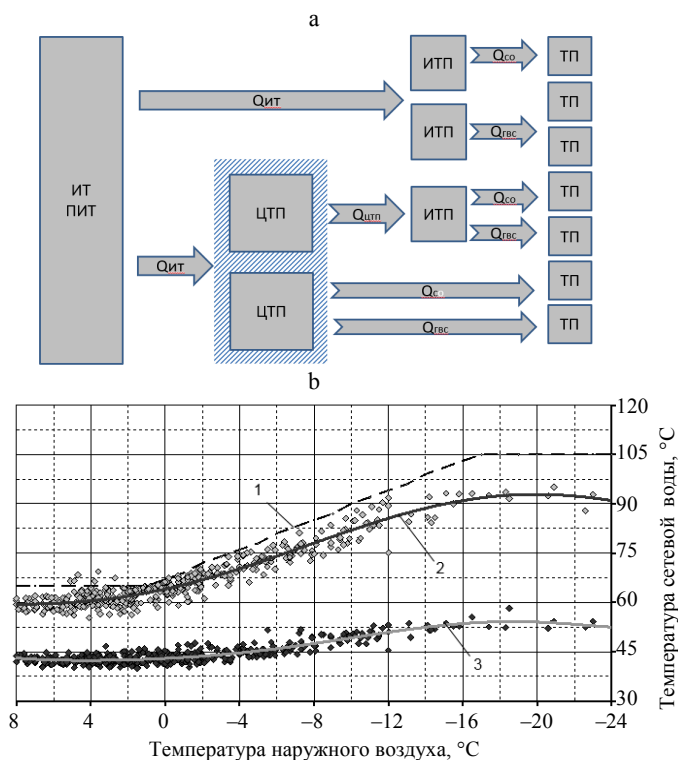
- разработки методического обеспечения для определения рациональных мощностей электродогревателей (ЭК), аккумуляторов теплоты (АТ) и тепловых насосов (ТН) для отдельных теплопотребителей и всего микрорайона в целом с учетом характеристик сложившихся и перспективных суточных графиков теплопотребления;

- аудита состава и состояния имеющегося оборудования ТП, в том числе оснащения их средствами автоматизации, и определения возможности установки дополнительного оборудования;

- определения критерия эффективности и формирования целевой функции оптимизации предлагаемого технического решения интеграции электрических и тепловых сетей жилого микрорайона.

Рассмотрим технические возможности и решения по модернизации ТП. Хорошо известно, что в городах Беларуси до середины 90-х гг. прошлого столетия в большинстве случаев квартальные системы теплоснабжения строились с центральными тепловыми пунктами (ЦТП) и абонентскими вводами в здания (рис. 1), более позднее строительство шло в основном с применением технологии индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), размещенных непосредственно в подвальных помещениях зданий. Характерная структурная схема системы теплоснабжения, а также фактические температурные режимы представлены на рис. 1. При проектировании нового строительства в зонах существующих систем централизованного теп-

лоснабжения однозначно следует ориентироваться при подключении новых потребителей на применение гибридных ИТП. Это еще целесообразно и потому, что большинство существующих теплоисточников избыточны по установленной генерирующей мощности по отношению к сложившимся в последние десятилетия тепловым нагрузкам.



1, 2 – проектная и фактическая температуры прямой сетевой воды;
3 – фактическая температура обратной сетевой воды

Рис. 1. а – сложившаяся структура районной тепловой сети;
б – вид фактического температурного графика: ИТ ПИТ – источник (пиковый) тепловой энергии; ЦТП – центральный тепловой пункт; ИТП – индивидуальный тепловой пункт; ТП – тепловой потребитель [11]

Fig. 1. а – existing structure of the district heating network;
б – supply and return temperature variation of the network: HS – heat source; PHS – peak heat source; CHSS – central heat supply station; IHSS – individual heat supply station
HC – heat consumer [11]

Сравнивая затраты на установку дополнительного оборудования на существующих ЦТП и ИТП, следует отметить, что при модернизации ЦТП требуются меньшие капитальные затраты по установке оборудования (электродкотлов и тепловых насосов), но необходимо применение инновационных решений конструктивного оформления тепловых аккумуляторов из-за ограничений использования водяных систем теплового аккумулирования ввиду сложности установки баков большой емкости внутри жилого сектора. В то же время, ввиду возможности применения на ИТП генериру-

ющего оборудования меньшей единичной мощности, удельные капитальные затраты увеличиваются, но облегчается решение вопроса размещения тепловых аккумуляторов.

Ключевым моментом выбора мощностей дополнительного оборудования являются анализ и сопоставление тепловых и электрических нагрузок. При проектировании новых микрорайонов обычно для этого используют нормативно-правовую литературу [14], чтобы заранее сбалансировать рациональное соотношение мощностей электрической и тепловой сетей. Для существующих жилых микрорайонов эти данные могут быть получены проектной организацией по запросу от энергоснабжающих предприятий. Однако, как показывает практика, несмотря на длительный период (более двадцати пяти лет) создания и развития в республике автоматизированных систем учета генерации и потребления энергоресурсов, получить информацию о суточных графиках электрических и тепловых нагрузок конкретных жилых районов достаточно проблематично, а порой просто невозможно. Архивы, как правило, содержат только данные суммарного суточного потребления энергии. И это несмотря на то, что еще более двадцати лет назад в нашей стране были внедрены системы АСУ ТП теплоснабжения, полностью отражающие современные требования цифровой возможности для получения и эффективного использования подобной информации [15]. Поэтому в большинстве случаев следует ориентироваться на информацию о нагрузке теплоисточников и на общие соображения, характеризующие подходы использования энергетического оборудования на гибридных тепловых пунктах.

Теплоснабжение в условиях стран с умеренным и суровым климатом имеет свои особенности ввиду многопрофильности нагрузки [16], из которой для жилых микрорайонов главными являются нагрузки подсистемы горячего водоснабжения (ПСГВС) и подсистемы отопления (ПСО). В последние годы все больше говорят и о системах централизованного хладоснабжения в летний период, которые находят все большее применение в западных странах [17, 18]. Однако в нашем случае нагрузка хладоснабжения пока не рассматривалась. ПСГВС в идеале должна работать круглый год, и при этом следует отметить, что, ориентируясь на среднесуточную нагрузку, необходимо учитывать, что максимальные нагрузки являются достаточно кратковременными (до 2–3 ч/сут.) и могут превышать среднесуточные в 2,5–3 раза (рис. 2). В общем виде график температурной нагрузки можно аппроксимировать функцией вида

$$Q_{\text{ГВС}}^{\tau} = \begin{cases} a_{01} Q_{\text{ГВС}}^{\text{p}} & \text{при } 0 < \tau \leq \tau_1; \\ a_{02} + a_{12} \tau + a_{22} \tau^2 & \text{при } \tau_1 < \tau \leq \tau_2; \\ a_{03} Q_{\text{ГВС}}^{\text{p}} & \text{при } \tau_2 < \tau \leq \tau_3; \\ a_{04} + a_{14} \tau + a_{24} \tau^2 & \text{при } \tau_3 < \tau \leq 24, \end{cases}$$

где τ – текущее время суток, ч; $0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, 24$ – границы интервалов отрезков времени суток, ч; $\alpha_{01}, \alpha_{02}, \alpha_{03}, \alpha_{04}, \alpha_{12}, \alpha_{14}, \alpha_{22}, \alpha_{24}$ – коэффициенты уравнения, аппроксимирующего график нагрузок.

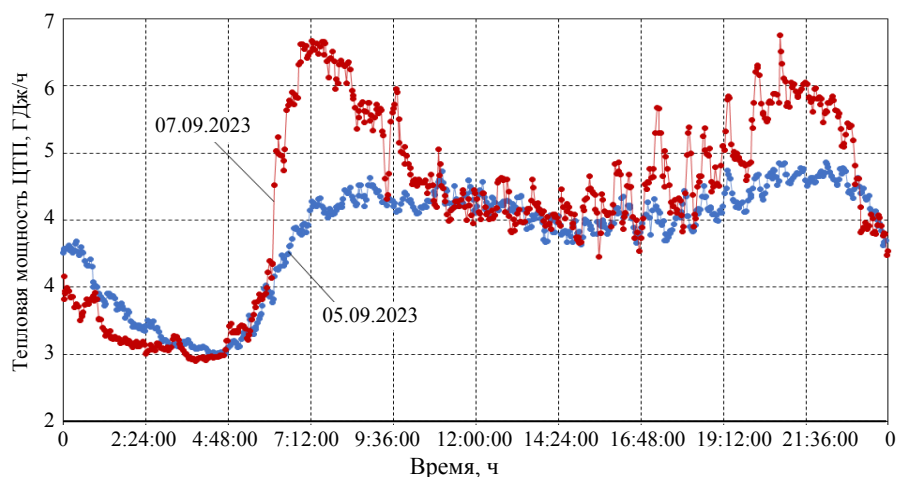


Рис. 2. Суточный тренд изменения нагрузки системы горячего водоснабжения ЦТП для рабочего (5.09.2023) и выходного дня (7.09.2023)

Fig. 2. Daily load profile of hot water supply system of central heat supply station [ЦТП – TsTP] for working day (5.09.2023) and for day off (7.09.2023)

Однако так как при определении коэффициентов уравнения необходимо учитывать зависимость профиля нагрузки от дня недели по календарю (рабочий, суббота, воскресенье, праздничный) и в самом уравнении отсутствуют факторы, учитывающие инерционность процессов переноса теплоты в системах теплоснабжения, то использование данного уравнения для краткосрочного прогнозирования дает большие погрешности. Поэтому целесообразно рассматривать другие математические подходы к краткосрочному прогнозированию, например методы нейросетевого программирования [19].

Время функционирования ПСО в условиях Беларуси составляет около 4000 ч/год. При этом тепловая нагрузка ПО в течение отопительного сезона в зависимости от температуры наружного воздуха изменяется в пределах от 0,2 до 1,0 от максимально-расчетной, определяемой по расчетной температуре для отопления в регионе. Среднее значение по отопительному сезону лежит в пределах 0,35–0,55 от максимально-расчетного в зависимости от климатических условий в зимний период года. На рис. 3 представлены годовые данные отпуска тепловой энергии от районной отопительной котельной в СЦТ (в относительных единицах по сравнению с максимальным значением) на фоне динамики изменения температуры наружного воздуха в период с 2015 по 2020 г., в котором подключенная тепловая нагрузка оставалась неизменной.

Анализ фактических данных при расчете по номинальной мощности установленного оборудования теплоисточников (без учета резервных мощностей) показывает, что время загрузки энергогенерирующего оборудования ПСГВС составляет 6000–6500 ч/год, а для ПСО соответственно 1800–2200 ч/год [9]. Следовательно, при рассмотрении гибридных систем теплоснабжения по фактору времени использования номинальных мощностей предпочтение следует отдавать выбору мощности генерирующего оборудования по нагруз-

ке ПСГВС [20]. Очевидно, необходимо рассматривать два основных режима работы при выборе мощности энергогенерирующего оборудования:

- только ночное потребление электроэнергии на нужды ПСГВС;
- ночное потребление электроэнергии на нужды ПСГВС с дополнительным включением электродкотлов в часы дневных минимумов графиков энергопотребления.

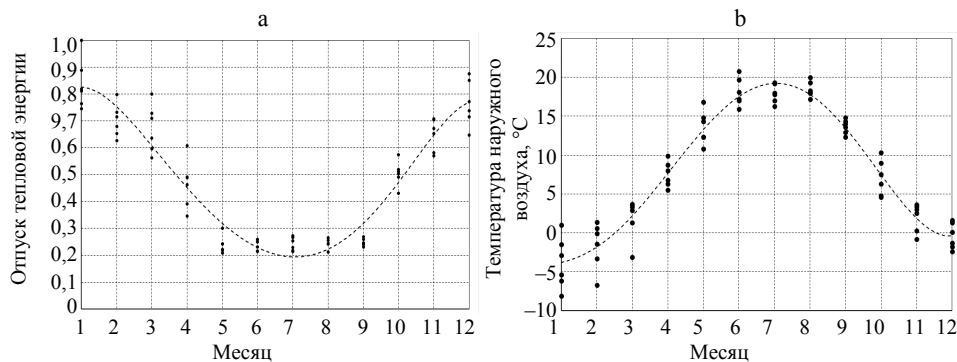


Рис. 3. Отпуск тепловой энергии районной котельной (а) на фоне динамики изменения температуры наружного воздуха (b) в период 2015–2020 гг.

Fig. 3. Average heat production of district boiler house (a) and ambient temperature variation (b) in the period of 2015–2020

Если при новом строительстве электрическая инфраструктура микрорайонов может сразу планироваться под требуемые нагрузки с учетом установки электродкотлов, то при модернизации энергетической инфраструктуры для существующих микрорайонов следует учитывать возможности установленных мощностей электрических трансформаторных подстанций (ЭТП) с позиции их загрузки в ночное время и в часы дневных минимумов графиков энергопотребления. Выбор мощности электродкотлов и аккумуляторов теплоты выполняется по условию возможности генерации всей энергии, т. е. с режимом по первому варианту, если по условиям свободной мощности трансформаторов это допустимо, или с режимом по второму варианту с работой и в дневное время. Это определяется тем, что развитие мощности электрической инфраструктуры может потребовать достаточно больших дополнительных капитальных вложений или невозможно вообще. В то же время при капитальных ремонтах внутренних электросетей микрорайонов может рассматриваться вариант с повышением мощности ЭТП и пересмотром стратегии выбора мощностей дополнительно теплогенерирующего оборудования.

В [10] представлены варианты принципиальных схем тепловых пунктов в гибридном исполнении. В простом случае дополнительно устанавливаются электродкотлы и аккумуляторы теплоты, более сложными являются схемы с тепловыми насосами. Традиционно ЦТП исполняет роль распределения и регулирования тепловых нагрузок между системами отопления и горячего водоснабжения. Предлагается добавить ЦТП функции производства и аккумуляции тепловой энергии. С этой целью рассматривается установка на ЦТП дополнительно электроподогревателей (ЭК), аккумуляторов теплоты и электродкотлов.

муляторов теплоты (АТ) и тепловых насосов (ТН). Целесообразнее рассматривать вариант включения АТ в контур теплоносителя тепловой сети, так как это придает схеме большую гибкость, что позволяет корректировать температурный график тепловой сети в сторону понижения и обеспечивать более глубокую интеграция с энергосистемой.

Для схем с ТН предусматривается ночная работа ЭК с зарядкой ТА и выравниванием тепловой нагрузки ЦТП в течение суток или работой по электрическому графику системы. В дневное время ТН работают в режиме «вода–вода» или в «косвенном» режиме «воздух–вода». Электрическая мощность ТН выбирается из доступной дневной мощности трансформаторных подстанций микрорайона. Режим работы ТН выбирается по графику электрической нагрузки, т. е. допустимого энергопотребления. Также допускается режим работы ТН в режиме «вода–вода» во время отопительного сезона с целью понижения температуры обратной сетевой воды до температуры 10–15 °С. В этом случае как дополнительные факторы можно рассматривать возможность переохлажденной обратной сетевой воды для охлаждения дымовых газов в конденсационных экономайзерах или конденсаторах паровых турбин, если удастся держать в предполагаемом режиме всех теплопотребителей. Применение тепловых насосов более оптимально, но и в этом варианте следует рассматривать комплексные решения по изменению режимов всех элементов системы централизованного теплоснабжения.

Оценка экономической эффективности рассмотренных вариантов в части применения гибридных тепловых пунктов возможна только при государственном регулировании тарифов на электроэнергию, как это было реализовано в скандинавских странах, когда в начальном периоде эксплуатации пикового оборудования электроэнергия поставляется по ценам, близким к нулевым. Тем не менее наиважнейшим вопросам является определение целевой функции для оценки эффективности и оптимизации технических решений по применению гибридных систем теплоснабжения.

Анализ электрических нагрузок городских жилых микрорайонов

Как отмечалось выше, в последнее десятилетие развивается тенденция интеграции систем энергообеспечения городской жилищно-коммунальной сферы с вовлечением в нее низкотемпературных энергетических потоков, включая альтернативные энергетические ресурсы и вторичные побочные потоки производственных предприятий, находящихся в городской зоне [1, 3, 17, 18]. Проблема интеграции технических систем в области энергоснабжения является актуальной ввиду перспективы снижения затрат в период эксплуатации за счет синергетического эффекта. В дальнейшем предлагается разработка методики анализа и оценки эффективности последнего варианта при условии максимальной балансировки производства и потребления энергии.

В нашем случае рассматривается более узкая проблема интеграции систем электро- и теплоснабжения городских жилых микрорайонов применительно к условиям, сложившимся в энергосистеме Беларуси ввиду появления профицита электрических мощностей. Балансировка энергопотребле-

ния жилищно-коммунальным сектором возможна на разных уровнях: городском (в части микрорайонов строится по традиционной схеме раздельного тепло- и электроснабжения, а в другой части все потребности в энергии обеспечиваются за счет электрической энергии), районном, когда существующие здания обеспечиваются по традиционной схеме раздельного тепло- и электроснабжения, нового строительства – за счет электрической энергии, а также с помощью гибридных систем, которые одновременно могут использовать для теплоснабжения как тепловую энергию, так и электрическую. По последней схеме может модернизироваться существующий жилищный фонд, что значительно расширяет базу внедрения объектов с энергетическим потреблением.

Рассмотрим задачу интеграции систем энерго- и теплоснабжения в части использования гибридных тепловых пунктов, т. е. пунктов, оснащенных дополнительно к стандартному тепловому оборудованию электродкотлами и аккумуляторами теплоты применительно к городским микрорайонам.

Задача разделяется на две подзадачи;

– оценка ресурсной возможности использования электрической инфраструктуры для нужд теплоснабжения на основе исследования характера электрических нагрузок с целью определения свободных мощностей трансформаторных подстанций в микрорайоне в разрезе суток;

– выбор оптимального объема мощностей электродкотлов, которые можно разместить на тепловых пунктах на основе анализа тепловых нагрузок с учетом профицита (дефицита) генерирующих мощностей, обслуживающих рассматриваемый микрорайон.

Очевидно, что подходы к решению этой задачи разделяются на варианты нового строительства и модернизации существующей энергетической инфраструктуры жилых микрорайонов. Рассмотрим более детально второй вариант. По условиям наличия технических ограничений он более сложный, но в то же время в этом случае имеется возможность получить более достоверную информацию по реальным электрическим и тепловым нагрузкам. При этом очевидно, что расчет энергетических нагрузок является основой процесса проектирования гибридной системы, как и любой другой энергетической системы, в рамках которого выбирается структура системы, состав и мощность оборудования, что в конечном итоге определяет стоимость реализуемого варианта строительства.

В настоящее время для расчета нагрузок жилых и общественных зданий часто используют нормативно-технический документ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» [21], что требует конкретной оценки в каждом случае. По данным разработок, проведенных в Российской Федерации для вновь сооружаемых и реконструируемых зданий, удельная расчетная мощность установленного оборудования для домов с газовыми плитами составляет $0,01 \text{ кВт/м}^2$ и $T_n = 3000 \text{ ч}$ и для домов с электрическими плитами – $0,015 \text{ кВт/м}^2$ и $T_n = 3500 \text{ ч}$.

Исследования, проводимые в Российской Федерации по определению фактического потребления, показывают различные результаты. Авторами в [22] показано, что фактическое потребление превышает нормативы

на ~10 % в домах первой группы и ~20 % в домах второй группы. В то же время исследования, проведенные ассоциацией «Росэлектромонтаж», показали, что нормативы, указанные в НТД, существенно завышены по сравнению с реальными значениями. В [23] приведены результаты замеров по загрузке трансформаторных подстанций для различных городов Российской Федерации, которые показали, что порядка 80 % трансформаторов загружены менее чем на 30 %, следовательно, последние работают с низким КПД и большими потерями относительно передаваемой электроэнергии от 2 до 12 % при загрузке ТП от 5 до 30 %.

В [23] также представлены сводные суточные графики мощности для различных электропотребителей г. Казани, которые показали, что для одинаковых категорий потребителей мощности изменяются по одному закону, а часы максимумов для различных категорий смещены. Экономическая эффективность актуализации удельных нормативов потребляемой электрической мощности МКД определяется снижением значений их заявленной мощности, а соответственно и мощностей (количества) силовых трансформаторов городских трансформаторных подстанций, снижением сечений питающих кабелей, а следовательно, и капитальных затрат при строительстве и эксплуатации [23]. Очевидно, что построенный суточный график по фактическим данным для конкретной ЭТП позволяет определить допустимую мощность теплогенерирующего оборудования для интегрируемых ТП.

Тем не менее при отсутствии исходных данных по соотношению мощностей электрической и тепловой сетей при проведении технико-экономических расчетов следует использовать нормативную литературу по проектированию жилых микрорайонов, которая в рамках цифровизации экономики должна оперативно обновляться. Но в нашем случае приведенные результаты исследований в России доказывают возможность применения гибридных систем в теплоснабжении.

Структурно тепловые сети микрорайонов могут быть построены на базе как центральных тепловых пунктов с индивидуальными вводами в отдельные здания, так и индивидуальных тепловых пунктов либо комбинации этих решений. Реализация гибридной схемы на индивидуальных тепловых пунктах более простая, так как в домах достаточно подвальных помещений для размещения требуемой мощности тепловых аккумуляторов на сетевой воде. На центральных тепловых пунктах требуемые объемы водяных баков-аккумуляторов значительны и их размещение вызывает затруднения, в том числе по условию безопасности, так как их надо выносить за пределы помещения, что, в свою очередь, требует применения инновационных решений, например тепловых аккумуляторов на основе фазовых превращений рабочей среды или реверсного движения теплоносителя в распределительных тепловых сетях.

По времени использования генерирующих мощностей предпочтение следует отдавать вариантам по покрытию нагрузки горячего водоснабжения. В расчете по средней суточной нагрузке время использования мощности в этом случае лежит в пределах 6000–6500 ч/год, в то же время для отопительной нагрузки это значение не превышает 2000 ч/год. При инте-

грации систем электро- и теплоснабжения целесообразно рассматривать два варианта: только ночное потребление электроэнергии и ночное потребление плюс потребление в часы дневных провалов графика электропотребления.

Если при новом строительстве мощность электрической сети может варьироваться в зависимости от выбранного варианта, то при модернизации действующей системы теплоснабжения задачу необходимо решать с учетом возможного ограничения по доступной электрической мощности. Поэтому отдельным вопросом является определение этих ограничений. Как правило, энергоаудит в жилом секторе систематически не проводится, поэтому определять мощности потребления энергии можно по статданным систем автоматизированного учета энергии или косвенным данным.

ВЫВОДЫ

1. В рамках интеграционных процессов в энергетике интерес представляет применение гибридных тепловых пунктов, обладающих возможностью использования для нужд теплоснабжения (низкопотенциального энергопотребителя) двух или более энергоресурсов. По сравнению с прямым потреблением электроэнергии на нужды теплоснабжения, которое априори является энергетически и экономически малоэффективным, 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.

2. Основное внимание должно быть уделено вопросам модернизации объектов систем теплоснабжения существующей застройки городской территории с СЦТ, определению экономически целесообразного потенциала интеграции тепловых и электрических сетей городских жилых микрорайонов в условиях профицита электроэнергии в региональной энергосистеме. Показано, что мощности трансформаторных подстанций жилых микрорайонов и их режимы работы достаточны для ночного подключения к ним теплоэлектрогенерирующего оборудования в объемах мощностей, требуемых для покрытия суточных нагрузок горячего водоснабжения из расчета установки аккумуляторов теплоты. Представлены технические решения по модернизации тепловых пунктов с целью придания им свойств гибридности (в части возможности потребления как тепловой, так и электрической энергии).

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор Т22УЗБ-052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воропай, Н. И. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология / Н. И. Воропай, В. А. Стенников, Е. А. Барахтенко // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5. С. 39–49.

2. Седнин, В. А. Интеграционные тенденции в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сб. тр. / Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2021. С. 24–28.
3. Стенников, В. А. Устойчивое развитие энергетики: тенденции и вызовы / В. А. Стенников // Энергетическая политика. 2023. № 2 (180). С. 32–39. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2023_2180_32.
4. Mathiesen, B. Global Smart Energy Systems Redesign to Meet the Paris Agreement / B. Mathiesen, H. Lund // Smart Energy. 2021. Vol. 1. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100024>.
5. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system / H. Yilmaz [et al.] // Energy Strategy Reviews. 2018. Vol. 20. P. 6–19. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.009>.
6. 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>.
7. Classification, potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and thermal Energy Storage in Energy Systems: A Review / Md. Nasimul Islam Maruf [et al.] // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53, Part B. P. 102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>.
8. Седнин, В. А. Эффективность применения электродкотлов в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин, А. А. Матявин // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т имени Ю.А. Гагарина, 2018. Вып. 9. С. 146–151.
9. Седнин, В. А. Анализ состояния и основные тенденции развития системы централизованного теплоснабжения в Беларуси / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Энергия и Менеджмент. 2016. № 6 (93). С. 2–9.
10. Седнин, В. А. Тенденции развития систем централизованного теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Междунар. науч.-техн. конф., Ульяновск, 21–22 апреля 2017 г.: в 2 т. / науч. ред. В. И. Шарапов. Ульяновск: Ульяновский ГТУ, 2017. Т. 1. С. 55–58.
11. Седнин, В. А. Энергетическая и экономическая эффективность применения низкотемпературного теплоснабжения в условиях Республики Беларусь / В. А. Седнин, А. В. Седнин, М. И. Позднякова // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: материалы Первой всерос. науч.-техн. конф. / УлГТУ. Ульяновск, 2021. С. 184–188.
12. Седнин, А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения / А. В. Седнин, А. В. Жерело // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
13. Sednin, A. On the Recovery of Lost Data During the Formation of Digital Twins of Heat Supply Systems / A. Sednin, A. Zherelo // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2023. Vol. 26, No 2. P. 16–173. <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2023-26-2-166-173>.
14. Седнин, В. А. К выбору варианта системы теплоснабжения поселка городского типа в условиях профицита мощностей производства электроэнергии энергосистемы / В. А. Седнин, М. И. Позднякова // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сб. тр. / Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2022. С. 133–137.
15. Седнин, В. А. Теория и практика создания автоматизированных систем управления теплоснабжением / В. А. Седнин. Минск: БНТУ, 2005. 192 с.
16. Копко, В. М. Теплоснабжение / В. М. Копко. М.: Изд-во АСВ, 2017. 340 с.
17. 5th Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Existing Cases in Europe / S. Buffa [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 104. P. 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>.
18. District Heating and Cooling Networks with Decentralised Energy Substations: Opportunities and Barriers for Holistic Energy System Decarbonization / O. Angelidis [et al.] // Energy. 2023. Vol. 269. P. 126740. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126740>.

19. Седнин, В. А. Краткосрочное планирование тепловой нагрузки районной котельной с применением нейросетевого моделирования / В. А. Седнин, Д. И. Власюк, М. И. Позднякова // Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы Первой науч.-техн. конф. студ. и асп. с междунар. участием / УлГТУ. Ульяновск, 2021. С. 198–203.
 20. Седнин, В. А. Перевод отопительных котельных в мини-ТЭЦ. Ч. 1. / В. А. Седнин, А. В. Седнин, А. А. Шимукович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2005. № 5. С. 72–77.
 21. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа: СП 256.1325800.2016 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. 2016. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200139957>.
 22. Ефременко, В. М. Анализ потребления электроэнергии в жилых помещениях многоквартирных домов / В. М. Ефременко, А. С. Шеварухин // Вестник КузГТУ. 2012. № 5. С. 76–77.
 23. Актуализация электрических нагрузок многоквартирных жилых домов / Ю. И. Солуянов [и др.] // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 180–189.
- Поступила 16.08.2023 Подписана в печать 20.10.2023 Опубликовано онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Voropay N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A. (2017) Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy. *Studies on Russian Economic Development*, 28, 492–499. <https://doi.org/10.1134/s107570071705015x>.
2. Sednin V. A., Sednin A. V. (2021) Integration Trends in Heat Supply Systems. *Problemy Ekologii i Ekspluatatsii Ob'ektov Energetiki: Sb. Tr.* [Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities: Collected Works]. Kyiv, Engineering and Production Center, Scientific and Technological Diamond Concern, National Academy of Sciences of Ukraine, 24–28 (in Russian).
3. Stennikov V. A. (2023) Sustainable Energy Development: Trends and Challenges. *Energeticheskaya Politika = Energy Policy*, (2), 32–39 (in Russian). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2023_2180_32.
4. Mathiesen B., Lund H. (2021) Global Smart Energy Systems Redesign to Meet the Paris Agreement. *Smart Energy*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100024>.
5. Yilmaz H., Keles D., Chiodi A., Hartel R., Mikulić M. (2018) Analysis of the Power-to-Heat Potential in the European Energy System. *Energy Strategy Reviews*, 20, 6–19. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.009>.
6. 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>.
7. Md. Nasimul Islam Maruf, Morales-España G., Sijm J., Helistö N., Kiviluoma J. (2022) Classification, Potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and Thermal Energy Storage in Energy Systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, Part B, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>.
8. Sednin V. A., Sednin A. V., Matyavin A. A. (2018) Efficiency of Using Electric Boilers in Heat Supply Systems. *Problemy Sovershenstvovaniya Toplivno-Energeticheskogo Kompleksa: Materialy XIV Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Saratov, 30 Oktyabrya – 01 Noyabrya 2018 g.* [Problems of Improving the Fuel and Energy Complex: Proceedings of 14th International Scientific and Technical Conference, Saratov, October 30 – November 01 2018]. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, iss. 9, 146–151 (in Russian).
9. Sednin V. A., Sednin A. V. (2016) Analysis of the State and Main Trends in the Development of the Centralized Heat Supply System in Belarus. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (6), 2–9 (in Russian).
10. Sednin V. A., Sednin A. V. (2017) Trends in the Development of District Heating Systems. *Energoberezhenie v Gorodskom Khozyaistve, Energetike, Promyshlennosti: Sed'maya*

- Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Ulyanovsk, 21–22 Aprelya 2017 g.* [Energy Saving in Urban Management, Energy, Industry: 7th International Scientific and Technical Conference, Ulyanovsk, April 21–22, 2017. Vol. 1]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 55–58 (in Russian).
11. Sednin V. A. Energy and Economic Efficiency of Using Low-Temperature Heat Supply in the Conditions of the Republic of Belarus / V. A. Sednin, A. V. Sednin, M. I. Pozdnyakova // Development of Applied Mathematics Methods for Solving Interdisciplinary Energy Problems: Proceedings of the First All-Russian Scientific and Technical Conference / Publishing House of UIGTU [Ulyanovsk State Technical University]. Ulyanovsk, 2021. P. 184–188.
 12. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating Systems. *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> (in Russian).
 13. Sednin A., Zherelo A. (2023) On the Recovery of Lost Data During the Formation of Digital Twins of Heat Supply Systems. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 26 (2), 166–173. <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2023-26-2-166-173>.
 14. Sednin V. A., Pozdnyakova M. I. (2022) To the choice of a Heat Supply System Option for an Urban Settlement in Conditions of Surplus Power Generation Capacity of the Energy System. *Problemy Ekologii i Eksploatatsii Ob'Ektov Energetiki: Sb. Tr.* [Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities: Collected works]. Kyiv, Engineering and Production Center, Scientific and Technological Diamond Concern, National Academy of Sciences of Ukraine, 133–137 (in Russian).
 15. Sednin V. A. (2005) *Theory and Practice of Creating Automated Heat Supply Control Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University. 192 (in Russian).
 16. Kopko V. M. (2017) *Heat supply*. Moscow, ASV Publ. 340 (in Russian).
 17. Buffà S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R. (2019) 5th Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Existing Cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>.
 18. Angelidis O., Ioannou A., Friedrich D., Thomson A., Falcone G. (2023) District Heating and Cooling Networks with Decentralised Energy Substations: Opportunities and Barriers for Holistic Energy System Decarbonisation *Energy*, 269, 126740. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126740>.
 19. Sednin V. A., Vlasyuk D. I., Pozdnyakova M. I. (2021) Short-Term Planning of the Heat Load of a District Boiler House Using Neural Network Modeling. *Energy Efficient Technologies in Construction, Energy and Housing and Communal Services: Materials of the First Scientific and Technical. Conf. Students and Graduate Students From the International. Participation* [Energy-Efficient Technologies in Construction, Energy and Housing and Communal Services: Proceedings of the 1st Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Graduate Students with International Participation]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 198–203 (in Russian).
 20. Sednin V. A., Sednin A. V., Shimoukovich A. A. (2005) Conversion of Boiler-Houses in Mini-Thermal Power Stations. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 72–77 (in Russian).
 21. SP 256.1325800.2016. Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Design and Installation Rules. *Electronic Fund of Legal, Regulatory and Technical Documents*. 2016. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200139957> (in Russian).
 22. Efremenko V. M., Shevarukhin A. S. (2012) Analysis of Electricity Consumption In Residential Premises of Apartment Buildings. *Vestnik KuzGTU = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, (5), 76–77 (in Russian).
 23. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Soluyanov D. Yu., Akhmetshin A. R. (2020) Updating Electrical Loads of Multi-Apartment Residential Buildings. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta* [Bulletin of Chuvash State University], (1), 180–189 (in Russian).