

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460>

УДК 697.34

Система теплоснабжения «умного дома» на базе централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов при помощи теплового насоса

И. Л. Иокова¹⁾, М. Б. Перехвал¹⁾, И. Е. Мигуцкий¹⁾

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

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

Реферат. Одним из важнейших аспектов «умного дома» является его теплоснабжение, которое должно обеспечивать комфортные условия проживания для жильцов и при этом быть эффективным с точки зрения энергопотребления. В настоящей статье рассматривается инновационный подход к системе теплоснабжения в «умных домах», который основан на использовании централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов с использованием теплового насоса. Предлагаемая система теплоснабжения сочетает преимущества классического централизованного теплоснабжения и эффективность тепловых насосов. Предложена расчетная схема, для которой построен температурный график, а также методика расчета тепловых нагрузок для классической схемы теплоснабжения и для ТЭЦ с применением тепловых насосов, согласно которой произведены необходимые расчеты. Для наглядности полученных данных построен график зависимости суммарной паровой нагрузки, необходимой для теплоснабжения, от температуры окружающей среды, а также график зависимости паровой нагрузки от продолжительности стояния температуры окружающей среды. В результате анализа полученных данных определено, что использование тепловых насосов в схемах ТЭЦ снижает генерацию электроэнергии за счет исключения ее выработки на потоке пара в конденсатор, что облегчает покрытие графика электропотребления в части прохождения минимумов нагрузок объединенной энергосистемы. Также интеграция теплового насоса в тепловую схему системы централизованного теплоснабжения позволяет подавлять диссипацию энергии, снижает выбросы парниковых газов в атмосферу, таким образом делая теплоснабжение более устойчивым и экологически безопасным. При этом предложенная система теплоснабжения «умного дома» имеет высокие технико-экономические показатели, обеспечивающие инвестиционную привлекательность такого проекта.

Ключевые слова: «умный дом», система теплоснабжения, «умный город», тепловой насос, ТЭЦ, энергоэффективность

Для цитирования: Иокова, И. Л. Система теплоснабжения «умного дома» на базе централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов при помощи теплового насоса / И. Л. Иокова, М. Б. Перехвал, И. Е. Мигуцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 451–460. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460>

Адрес для переписки

Иокова Ирина Леонидовна
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 (17) 293-92-16
E-mail: pte@bntu.by

Address for correspondence

Iokova Irina L.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 (17) 293-92-16
E-mail: pte@bntu.by

The “Smart Home” Heat Supply System Based on District Heating with the Utilization of Secondary Energy Resources Using a heat Pump

I. L. Iokova¹⁾, M. B. Perekhval¹⁾, I. E. Migutskii¹⁾

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

Abstract. One of the most important aspects of a “smart home” is its heating system, which should provide comfortable living conditions for residents while also being energy-efficient. This article discusses an innovative approach to heating systems in “smart homes” based on centralized heating with the utilization of secondary energy resources using a heat pump. The proposed heating system combines the advantages of traditional centralized heating and the efficiency of heat pumps. The article presents a calculated scheme, for which a temperature chart was developed. A methodology for calculating heat loads for both the traditional heating scheme and combined heat and power (CHP) with heat pumps is also proposed, and the necessary calculations were carried out. For clarity of the obtained data, a graph depicting the total steam load required for heating as a function of ambient temperature is constructed, as well as a graph showing the steam load as a function of the duration of the ambient temperature. The analysis of the data revealed that the use of heat pumps in CHP schemes reduces electricity generation by eliminating its production in the steam flow in the condenser. This facilitates the coverage of the electricity consumption schedule during periods of low demand for the integrated energy system. Additionally, integrating a heat pump into the heating system of the centralized heating system helps reduce energy dissipation and greenhouse gas emissions into the atmosphere, making heating more sustainable and environmentally friendly. Moreover, the proposed heating system for a “smart home” demonstrates high technical and economic performance, ensuring the investment attractiveness of such a project.

Keywords: “smart home”, heating system, “smart city”, heat pump, combined heat and power (CHP), energy efficiency

For citation: Iokova I. L., Perekhval M. B., Migutskii I. E. (2023) The “Smart Home” Heat Supply System Based on District Heating with the Utilization of Secondary Energy Resources Using a heat Pump. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 451–460. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460> (in Russian)

Введение

В последнее время «умные дома» становятся все более популярными. Само понятие «умный дом» (Smart Home) – это концепция, в которой различные системы и устройства в доме связываются между собой, что позволяет обеспечить более быстрое, комфортное и эффективное управление различными аспектами жизни внутри такого дома. Для этих целей всегда используются современные технологии.

К системам «умного дома», помимо других, также относятся системы управления освещением и климатом в помещении. Кроме удобства использования, одним из ключевых критериев популярности строительства «умных домов» является их энергоэффективность: «умные дома» позволяют снизить потребление тепловой и электрической энергии, что, в свою очередь, приводит к снижению счетов потребителей за коммунальные услуги.

С развитием современных технологий также стоит ожидать появления «умных кварталов» и целых «умных городов». «Умный город» (Smart

City) – это широкая концепция развития городской инфраструктуры с использованием современных технологий, которая включает в себя контроль и управление различными сферами жизни, системами и ресурсами, такими как общественная безопасность, транспорт, образование, здравоохранение, энергетика и прочее.

Основная цель «умного города», как и «умного дома», – сделать нашу жизнь проще, удобнее, эффективнее и экологически безопаснее.

Что касается энергетике, то появление интеллектуальных устройств, например для учета и контроля расхода различных видов энергии, позволило повысить эффективность энергосистемы за счет «умного» управления электрической сетью и системой теплоснабжения. Это предоставляет возможность в режиме реального времени оценивать спрос, адаптировать к нему мощности источников энергии и принимать решения по экономии энергии в зависимости от стоимости тарифов в течение суток [1].

С учетом постоянного удорожания ископаемых ресурсов, оказывающего существенное влияние на величину эксплуатационных затрат в жилищном секторе и стоимость коммунальных услуг в отопительный период, в Республике Беларусь постоянно растет интерес к энергосбережению как при новом строительстве, так и при проведении тепловой модернизации и реконструкции уже построенных жилых домов. В связи с этим использование современных технологий для снижения уровня потребляемой зданием энергии является одним из приоритетных направлений развития строящегося и существующего жилищного фонда. Также актуальным остается вопрос определения подходов к реализации концепции «умного (энергоэффективного) дома» в условиях Республики Беларусь [2].

Основная часть

Основная система теплоснабжения в Республике Беларусь – централизованная система теплоснабжения [3, 4]. Это касается и многих других стран. Так, например, в некоторых городах Германии централизованное теплоснабжение также играет большую роль. Здесь преобладает теплогенерация за счет газа, угля, мазута. Однако централизованные системы теплоснабжения обладают относительно невысоким КПД, поэтому декарбонизация тепловых сетей является важной задачей наряду с модернизацией инженерно-технических систем зданий. В последние годы проявился тренд использования в этих целях тепловых насосов [5].

Тепловые насосы широко применяются для отопления зданий, горячего водоснабжения (ГВС), а также для кондиционирования помещений. Они являются эффективным и экологически более дружелюбным способом получения теплоты, особенно при сравнении с традиционными системами отопления, которые используют ископаемые топлива [6].

Тепловой насос – это эффективная система, которую можно масштабировать. Существующие на сегодняшний день условия внедрения инженерно-технических систем в зданиях (системы водяного отопления) оптималь-

ны для тепловых насосов, но с учетом энергоэффективности здания необходима модернизация здания в целом, поскольку речь идет о годовой потребности в тепловой энергии и возможностях низкотемпературных систем. Проблема в том, что по мере электрификации сектора отопления создается все более и более зависимый от температуры профиль электрической нагрузки, если взять в расчет годовой период.

В данной статье рассматривается вариант применения теплового насоса в схеме ТЭЦ. Централизованное теплоснабжение в основном осуществляется благодаря паротурбинным циклам, среди которых наибольшее распространение получил турбоагрегат типа ПТ-60 [7]. В таком случае тепловой насос, предназначенный для отопления, использует теплоту конденсации отработанного пара, благодаря чему обеспечивает экономию природного газа и уменьшает вредные выбросы в окружающую среду без изменения централизованной системы теплоснабжения, т. е. выступает в роли дополнения к существующей системе и также позволяет оставить неизменными тепловые узлы и пункты. Такой вариант теплоснабжения «умного дома», на наш взгляд, является оптимальным.

Для привода теплового насоса требуется энергия в тепловой или механической (электрической) форме. В первом случае применяются абсорбционные тепловые насосы (АБТН), во втором – парокомпрессионные тепловые насосы (ПКТН). Мерой энергетической эффективности тех и других принято считать энергетический КПД, получивший у нас название отопительного коэффициента ($K_{от}$), а в иностранной литературе – коэффициента преобразования (COP).

Абсорбционный тепловой насос – устройство непрерывного действия, предназначенное для передачи тепловой энергии от источника с более низкой температурой к источнику с более высокой температурой. Для компенсации подобного неестественного перехода тепловой энергии требуется на привод АБТН затратить тепловую энергию. Абсорбционные установки обратного цикла уступают по энергетическим характеристикам парокомпрессионным машинам, но если последним для работы требуется энергетически и экономически более ценная механическая энергия, то первые могут использовать дешевую тепловую энергию отборов паровых турбин, утилизационных котлов, энергии выхлопных газов газовых двигателей внутреннего сгорания, вторичных энергоресурсов. Это обстоятельство и определяет для АБТН нишу, которую они в ближайшее время займут в различных технологических системах [8].

При сравнении ПКТН и АБТН выявлено, что АБТН при равных условиях термодинамически более эффективен, так как эксергетический КПД его выше, чем у ПКТН [9], поэтому в статье будем рассматривать систему теплоснабжения с применением АБТН.

Работа предложенной системы теплоснабжения «умного дома» будет рассмотрена на примере строящегося многоквартирного жилого дома на ул. Одесской в г. Минске.

Для сопряжения АБТН с турбогенератором ПТ-60 можно использовать как два АБТН меньшего, так и один большего типоразмера. Более гибким представляется вариант с двумя АБТН. Для их привода могут использоваться различные теплоносители: пар, вода, дымовые газы, топливо. В данном случае будем использовать пар давлением не менее 0,4 МПа. В итоге выбираем два АБТН марки BDS 30 с суммарной теплопроизводительностью 2,8 МВт.

Упрощенная схема предложенной системы теплоснабжения представлена на рис. 1.

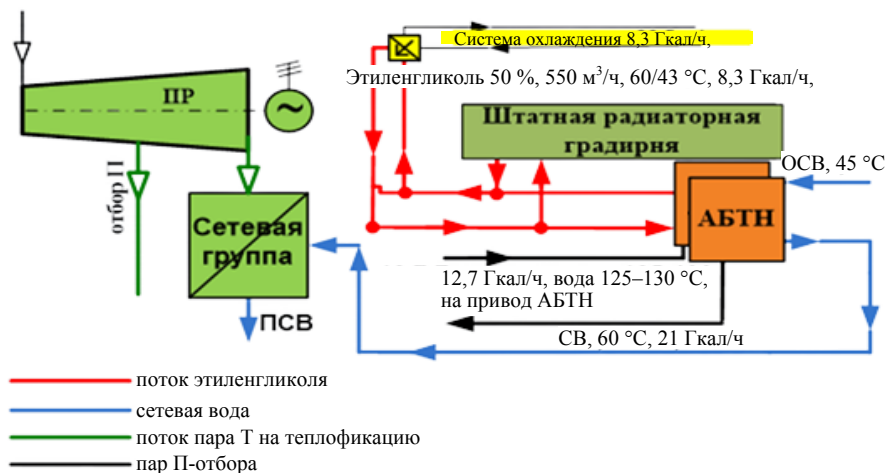


Рис. 1. Расчетная схема системы теплоснабжения

Fig. 1. Estimated diagram of the heat supply system

Методика и расчет системы теплоснабжения

Рассмотрим методику расчета для оценки предложенного варианта.

Нагрузку сетевой группы определяем по формуле

$$Q_{\text{сет.гр}} = Q_{\text{сум}} - Q_{\text{АБТН}}, \text{ МВт}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сет.гр}}$ – нагрузка на сетевую группу, МВт; $Q_{\text{сум}}$ – суммарная нагрузка, МВт; $Q_{\text{АБТН}}$ – нагрузка на АБТН, МВт.

В свою очередь, рассчитаем нагрузку на АБТН

$$Q_{\text{АБТН}} = \frac{(t''_{\text{АБТН}} - t_{\text{ОСВ}}) Q_{\text{сум}}}{(t_{\text{ПСВ}} - t_{\text{ОСВ}})}, \text{ МВт}, \quad (2)$$

где $t''_{\text{АБТН}}$ – температура воды, выходящая из АБТН, °С; $t_{\text{ОСВ}}$ – то же обратной сетевой воды (ОСВ), °С; $t_{\text{ПСВ}}$ – то же прямой сетевой воды (ПСВ), °С.

Нагрузка на привод АБТН

$$Q_{\text{привод}} = \frac{Q_{\text{АБТН}}}{\mu}, \text{ МВт}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент преобразования, или отопительный коэффициент, принимаемый равным 1,72.

Утилизируемый поток обратной воды:

$$Q_{\text{утилиз}} = Q_{\text{АБТН}} - Q_{\text{привод}}, \text{ МВт.} \quad (4)$$

Паровая нагрузка

$$Q_{\text{пар.}} = Q_{\text{сет.гр.}} + Q_{\text{привод}}, \text{ МВт.} \quad (5)$$

Экономия составит

$$\Xi = \frac{Q_{\text{утилиз}}}{Q_{\text{сум}}} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Результаты расчетов тепловых нагрузок на сетевую группу как для классической схемы теплоснабжения, так и для ТЭЦ с АБТН представлены в табл. 1 и 2 соответственно:

Таблица 1

Расчет тепловых нагрузок на сетевую группу для ТЭЦ
Calculation of thermal loads on the grid group for CHP

Температура окружающей среды, °С	-24	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	8	20
Отопительная нагрузка, МВт	1,33	1,20	1,07	0,95	0,82	0,69	0,57	0,44	0,32	0,0
Нагрузка ГВС, МВт	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Суммарная нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Температура сетевой воды (СВ) на выходе, °С	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Нагрузка сетевой группы, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Паровая нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17

Таблица 2

Расчет тепловых нагрузок на сетевую группу для ТЭЦ с АБТН
Calculation of thermal loads on the grid group for CHP with ABLHP

Температура окружающей среды, °С	-24	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	8	20
Отопительная нагрузка, МВт	1,33	1,20	1,07	0,95	0,82	0,69	0,57	0,44	0,32	0,00
Нагрузка ГВС, МВт	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Суммарная нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Температура ПСВ, °С	105,0	105,0	102,8	94,1	85,2	76,1	70,0	70,0	70,0	70,0
Температура ОСВ, °С	70,0	66,2	62,3	58,3	54,2	49,9	45,4	40,6	35,5	35,5
Температура СВ на выходе АБТН, °С	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Разность температур ПСВ и ОСВ	35,0	38,8	40,5	35,7	31,0	26,2	24,6	29,4	34,5	34,5
Разность на выходе из АБТН и ОСВ	—	—	—	1,7	5,8	10,1	14,6	19,4	24,5	24,5
Нагрузка АБТН, МВт	—	—	—	0,098	0,373	0,720	1,034	1,066	1,058	0,833

Окончание табл. 2

Температура окружающей среды, °C	-24	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	8	20
Нагрузка сетевой группы, МВт	2,50	2,37	2,25	2,02	1,62	1,15	0,71	0,55	0,43	0,34
СОР (μ)	–	–	–	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
Нагрузка пара на привод АБТН, МВт	–	–	–	0,057	0,217	0,418	0,601	0,620	0,615	0,484
Утилизируемая теплота, МВт	–	–	–	0,041	0,156	0,301	0,433	0,446	0,443	0,349
Экономия, %	–	–	–	1,9	7,8	16,1	24,9	27,6	29,8	29,8
Паровая нагрузка, МВт	2,500	2,370	2,250	2,078	1,837	1,566	1,308	1,168	1,045	0,823

Для расчетной схемы (рис. 1) согласно полученным данным (табл. 2) построим температурный график (рис. 2).

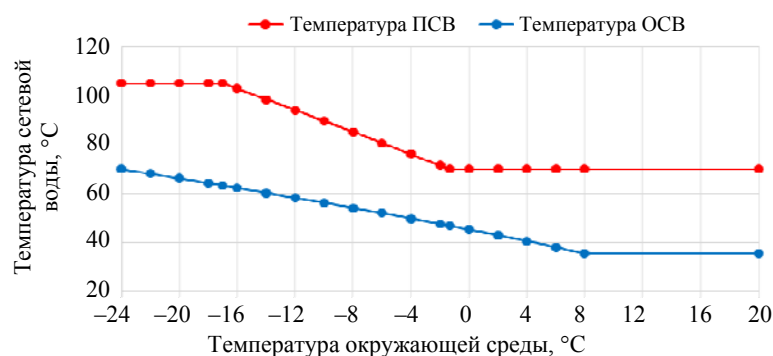


Рис. 2. Температурный график

Fig. 2. Temperature graph

По результатам расчетов, для наглядности полученных данных, построен график зависимости суммарной паровой нагрузки, необходимой для теплоснабжения, от температуры окружающей среды (рис. 3).

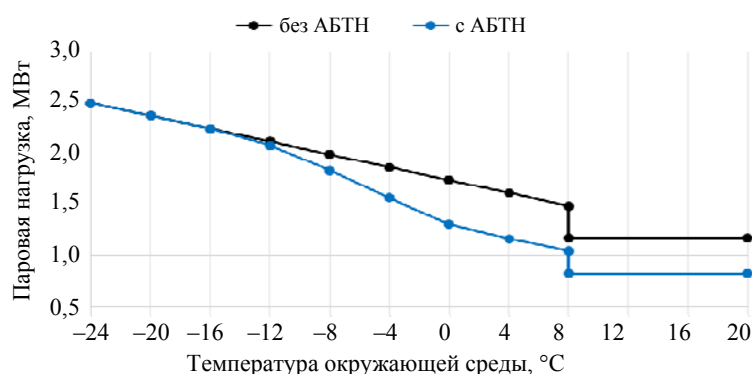


Рис. 3. График зависимости паровой нагрузки от температуры окружающей среды

Fig. 3. Graph of the dependence of the steam load on the ambient temperature

На графике (рис. 3) видно, что при одинаковой температуре окружающей среды паровая нагрузка, необходимая для теплоснабжения, для варианта ТЭЦ с АБТН ниже, чем по классическому варианту теплоснабжения.

Также для наглядности экономии построен график зависимости паровой нагрузки от продолжительности стояния температуры окружающей среды (рис. 4).

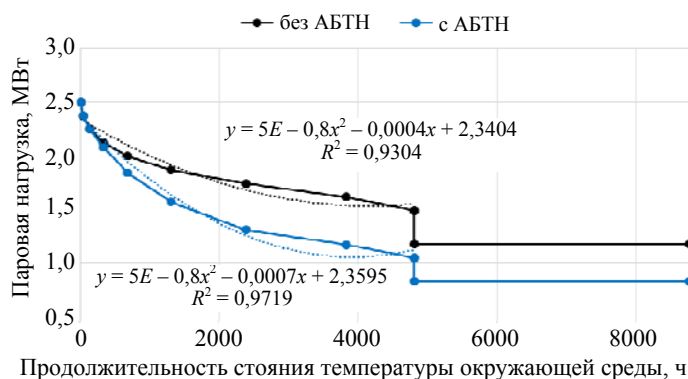


Рис. 4. График зависимости паровой нагрузки от продолжительности стояния температуры окружающей среды

Fig. 4. Graph of the dependence of the steam load on the duration of standing ambient temperature

Данный график (рис. 4) аппроксимирован, в результате чего были получены следующие полиномиальные зависимости:

$$y_1 = (5 \cdot 10^{-8})x^2 - (0,0004)x + 2,3404;$$

$$y_2 = (9 \cdot 10^{-8})x^2 - (0,0007)x + 2,3595.$$

Так как количество паровой нагрузки является площадью под графиком, эти зависимости проинтегрированы и определены следующие данные: так, для кривой, характеризующей работу ТЭЦ без АБТН, получено 13113,4 МВт·ч (11277,6 Гкал), а для кривой, характеризующей работу ТЭЦ с АБТН, получено 9841,6 МВт·ч (8463,8 Гкал) (рис. 4). Разницей, отражающей экономию, является разность площадей под графиком (рис. 4). Она составляет 3271,8 МВт·ч (2813,8 Гкал), или 467,1 т у. т.

Использование АБТН в схемах ТЭЦ снижает генерацию электроэнергии на ТЭЦ за счет исключения ее выработки на потоке пара в конденсатор, что, кроме всего прочего, облегчает покрытие графика электропотребления в части прохождения минимумов нагрузок объединенной энергосистемы [10]. Также с помощью интеграции АБТН в тепловую схему ТЭЦ обеспечивается блокирование рассеяния энергии. При этом имеют место высокие технико-экономические показатели, обеспечивающие инвестиционную привлекательность такого проекта.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная система теплоснабжения «умного дома», а в будущем «умного жилого комплекса» или даже «умного города» с использованием интеграции АБТН в тепловую схему ТЭЦ позволяет сохранить существующую классическую систему теплоснабжения, лишь модернизировав ее.

2. В результате расчета определено, что рассмотренная система теплоснабжения эффективна, позволяет экономить топливно-энергетические ресурсы.

3. Данное решение предоставляет возможность также повысить электрический КПД ТЭЦ за счет утилизации теплоты охлаждающей воды конденсатора турбины и нагрева тем самым ОСВ.

4. Применение таких систем теплоснабжения позволит уменьшить количество вредных выбросов в окружающую среду, тем самым улучшить экологическую картину квартала, затем района и впоследствии всего «умного города», если и далее двигаться в направлении «зеленого» жилищного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев, М. М. Будущее белорусской энергетики на фоне глобальных трендов: моногр. / М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. Минск: Изд. центр БГУ, 2018. 223 с.
2. Китиков, В. О. Электрическое отопление: проблемы и пути решения в Беларуси / В. О. Китиков, Ю. А. Башко // Энергоэффективность: сб. ст. Минск, 2022. С. 12–18.
3. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523>.
4. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 1 / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 44–56. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56>.
5. Кох, А. Варианты электрификации теплоснабжения в секторе зданий в Германии / А. Кох, А. Лоренц // Энергоэффективность: сб. ст. Минск, 2022. С. 18–22.
6. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. 3-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2015. 566 с.
7. Янчук, В. В. Регенеративное использование низкопотенциальных сбросных потоков теплоты ТЭЦ на примере цикла ПТ-60 [Электронный ресурс] / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электронный сб. статей I Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. С. 247–250. Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/38104>.
8. Перехвал, М. Б. Применение абсорбционных тепловых насосов и холодильных машин в различных секторах промышленности и жилищно-коммунального хозяйства / М. Б. Перехвал, П. А. Перехвал, И. Л. Иокова // Global Science and Innovations 2022: Central Asia. 2021. № 4 (18). С. 35–38.
9. Перехвал, М. Б. Сравнение эксергетической эффективности абсорбционного и парокомпрессионного тепловых насосов / М. Б. Перехвал, П. А. Перехвал; науч. рук. И. Л. Иокова // Бутаковские чтения: сб. ст. II Всерос. с междунар. участием молодежной конф. / под ред. А. С. Заворина; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2022. С. 563–565.

10. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергохозяйство предприятий: сб. ст. / сост.: В. Н. Романюк [и др.]. Минск, 2013. С. 14–19.

Поступила 15.06.2023 Подписана в печать 30.08.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Kovalev M. M., Kuznetsov A. S. (2018) *The Future of Belarusian Energy Against the Background of Global Trends*. Minsk: BSU Publishing Center. 223 (in Russian).
2. Kitikov V. O., Bozhko Yu. A. (2022) Electric Heating: Problems and Solutions in Belarus. *Energoeffektivnost': Sb. St.* [Energy Efficiency: Collected Papers]. Minsk, 12–18 (in Russian).
3. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2022) Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-511-523> (in Russian).
4. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. V., Bubyr T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 44–56. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56> (in Russian).
5. Koch A., Lorenz A. (2022) Options for Electrification of Heat Supply in the Building Sector in Germany. *Energoeffektivnost': Sb. St.* [Energy Efficiency: Collected Papers]. Minsk, 18–22 (in Russian).
6. Kudinov V. A., Kartashov E. M., Stefanyuk E. V. (2015) *Technical Thermodynamics and Heat Transfer*. 3rd ed., Moscow, Yurait Publ. 566 (in Russian).
7. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2023) Regenerative Use of Low-Potential Waste Heat Flows of Thermal Power Plants on the Example of the “PT-60” Cycle. *Aktual'nye Problemy Fiziki, Elektroniki i Energetiki: Elektronnyi Sbornik Statei I Mezhdunarodnoi Nauch.-Prakt. Konf., Novopolotsk, 27–28 Okt. 2022 g.* [Actual Problems of Physics, Electronics and Energy. Electronic Collection of the Articles of the I International Scientific and Practical Conference, Novopolotsk, October 27–28, 2022]. Novopolotsk, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 247–250 (in Russian).
8. Perekhval M. B., Perekhval P. A., Iokova I. L. (2021) Application of Absorption Heat Pumps and Refrigerating Machines in Various Sectors of Industry and Housing and Communal Services. *Global Science and Innovations 2022: Central Asia*, (4), 35–38 (in Russian).
9. Pereval M. B., Perekhval P. A. (2022) Comparison of the Exergetic Efficiency of Absorption and Vapor Compression Heat Pumps. *Butakovskie Chteniya: Sbornik Statei II Vserossiiskoi s Mezhdunarodnym Uchastiem Molodezhnoi Konferentsii* [Butakov Readings: Collection of the Articles of the II All-Russian Youth Conference with International Participation]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 563–565 (in Russian).
10. Romanyuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaya N. A. (2013) Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of a CHP Plant to Increase its Energy Efficiency. *Energo-khozyaistvo Predpriyatii: Sb. St.* [Energy Management of Enterprises. Collected Papers]. Minsk, 14–19 (in Russian).

Received: 15 June 2023

Accepted: 30 August 2023

Published online: 29 September 2023