

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>

УДК 620.97

О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь

Часть 2

Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин¹⁾, асп. Р. С. Игнатович¹⁾, И. Л. Иокова¹⁾

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

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

Реферат. В рамках обеспечения энергетической безопасности страны и проведения политики декарбонизации экономики в Республике Беларусь предполагается максимальное использование собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Однако открытым остается вопрос выбора вида теплоисточника в системах централизованного теплоснабжения при использовании местных видов топлива (МВТ). Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС и относительно высокая удельная стоимость электрогенерирующих мощностей на МВТ склоняют чашу весов к применению в качестве теплоисточников котельных. Исходя из мирового опыта развития и применения теплофикации как наиболее энергоэффективного решения в области теплоснабжения, исследована данная проблема в условиях Республики Беларусь. Показано, что электрическая мощность мини-ТЭЦ на традиционных МВТ, подключенных к объединенной системе страны, составляет менее 100 МВт, а основными технологиями, реализованными на мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь, являются традиционные ПСУ с водяным паром в качестве рабочего тела (11 электростанций) и ПСУ с органическим циклом Ренкина (ОРЦ) (3 электростанции). Географически мини-ТЭЦ, работающие на МВТ, расположены равномерно по всей территории Республики Беларусь. Определено число часов использования установленной мощности возобновляемых источников энергии Республики Беларусь. Явное преимущество имеют энергоисточники на органических отходах и биомассе (свыше 4000 ч/год) и на гидроресурсах (около 3500 ч/год), для которых показатель числа часов использования установленной мощности значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики. Кроме того, генерирующие мощности на биомассе имеют наименьший коэффициент поставки электроэнергии в Объединенную энергетическую систему Беларуси. На основе анализа современных тенденций развития энергетики сформулированы технико-экономические «факторы привлекательности» строительства теплофикационных систем теплоснабжения на МВТ в условиях Беларуси, к которым, помимо традиционных факторов (замещение импортируемого топлива – природного газа и нефти), относятся повышение качества и надежности энергообеспечения потребителей в удаленных точках, развитие полигенерации, снижение потерь электрической энергии на ее транспорт, участие в покрытии электрического графика нагрузок объединенной энергосистемы, а также указана возможность создания на базе мини-ТЭЦ энергетического хаба, структурированного под интеграцию энергетических подотраслей, источников распределенной генерации и опцию генерации «зеленых» энергоносителей.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии, декарбонизация, местные виды топлива, мини-ТЭЦ, мультиэнергетическая система, энергетический хаб, топливно-энергетические ресурсы, «факторы привлекательности»

Для цитирования: Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // *Наука и техника*. 2023. № 6. С. 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus

Part 2

Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾, I. L. Iokova¹⁾

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

Abstract. Within the framework of ensuring the country's energy security and pursuing a policy of decarbonization of the economy in the Republic of Belarus, it is assumed to maximize the use of its own fuel and energy resources (TER). However, the question of choosing the type of heat source in centralized heat supply systems when using local fuels (LF) remains open. The commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant and the relatively high unit cost of power generation capacities running on LF inclines the scales to use boiler houses as heat sources. Based on the world experience in the development and application of heating as the most energy-efficient solution in the field of heat supply, this problem has been studied in the conditions of Belarus. It is shown that the electric capacity of mini-thermal power plants using traditional LF connected to the unified system of the country is less than 100 MW, and the main technologies implemented at mini-thermal power plants using LF in the Republic of Belarus are traditional steam power plants with water steam as the working fluid (11 power plants) and steam power plant with organic Rankine cycle (ORC) (3 power plants). Geographically, mini-thermal power plants operating on LF are located evenly throughout the entire territory of the Republic of Belarus. The number of hours of use of the installed capacity of renewable energy sources (RES) of the Republic of Belarus has been determined. Energy sources based on organic waste and biomass (over 4,000 hours per year) and on hydro resources (about 3,500 hours per year) have a clear advantage, for which indicator of the number of hours of installed capacity use is much higher than for solar and wind power installations. In addition, biomass generating capacities have the lowest coefficient of electricity supply to the combined energy system. Based on the analysis of modern trends in the development of energy, technical and economic “attractiveness factors” for the construction of heating systems for heat supply on LF in the conditions of Belarus have been formulated, which, in addition to traditional factors (substitution of imported fuel – natural gas and oil), include improvement of the quality and reliability of energy supply to consumers in remote locations, development of polygeneration, reduction of losses of electric energy for its transport, participation in covering the electric load schedule of the unified power system, and also indicated the possibility of creating an energy hub on the basis of a mini-thermal power plant, structured for the integration of energy sub-sectors, distributed generation sources and the option of generating “green” energy carriers.

Keywords: energy security, renewable energy sources, decarbonization, local fuels, mini-thermal power plants, multi-energy system, energy hub, fuel and energy resources, attractiveness factors

For citation: Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2: Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus. *Science and Technique*. 22 (6), 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518> (in Russian)

Введение

Развитие атомной энергетики в Беларуси в последние десятилетия привело к вводу в 2023 г. в эксплуатацию двух энергоблоков общей мощностью 2,4 ГВт, что в корне меняет структуру энергетического баланса страны и позволяет сократить долю природного газа в нем с 90 до 60 % [4]. В то же время, для достижения целей обеспечения энергетической безопасности страны по индикатору «доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР» к 2035 г. удельный вес природного газа необходимо снизить до 50 % [2]. В работе [3] для достижения требуемой диверсифика-

ции топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) предлагается большое внимание уделить развитию теплофикации на местных видах топлива (МВТ), что в целом соответствует концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 г. [4], согласно которой при разработке систем теплоснабжения, удаленных от системы централизованного теплоснабжения населенных пунктов и районов, а также сельской местности необходимо производить оценку целесообразности использования МВТ. При этом нужно учитывать результаты инновационных тенденций развития экономики и, в первую очередь, изменения, которые несут цифровизация, а так-

же интеграция энергетики со смежными подотраслями. Следует также отметить, что тренд развития энергоисточников на МВТ в Беларуси совпадает с целями мирового сообщества по декарбонизации экономики и сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу [5, 6].

В [3, 7] отмечено, что за последнее десятилетие в Республике Беларусь проведен комплекс мероприятий по повышению вовлеченности МВТ в структуру ТЭР, но актуальным для исследований остается вопрос эффективности строительства и эксплуатации мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, с учетом профицита электрогенерирующих мощностей в объединенной энергосистеме страны [8].

Основная часть

Согласно [9], по состоянию на 1 сентября 2020 г., суммарная электрическая мощность установок ВИЭ в Республике Беларусь составляла 491 МВт, из которых порядка 89 МВт вырабатывалось на 10 мини-ТЭЦ, использующих древесное топливо. Вместе с этим в отчете МЭА по энергетическому профилю Республики Беларусь [10] на декабрь 2018 г. показано, что всего в стране эксплуатировалось 22 мини-ТЭЦ, использующих местные ТЭР, к которым помимо традиционной биомас-

сы отнесены попутный нефтяной газ, а также твердые бытовые отходы (ТБО), с установленной электрической мощностью 130 МВт и тепловой мощностью 345 МВт.

Информация об основных мини-ТЭЦ Республики Беларусь, работающих на традиционных для страны МВТ, а именно биомассе, представлена в табл. 1. Энергоисточники, использующие в качестве топлива биогаз, в сводную таблицу не вносились.

Из анализа табл. 1 следует, что основными технологиями, реализованными на мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь, являются традиционные ПСУ с водяным паром в качестве рабочего тела (11 электростанций) и ПСУ с органическим циклом Ренкина (ОРЦ) (на мини-ТЭЦ в г. Речице (Гомельская область), п. Сосны (Минской области) и г. п. Барань (Витебская область)). На рис. 1 приведена информация по расположению мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, на территории Республики Беларусь. По результатам установления квот на строительство возобновляемых источников энергии на период 2021–2023 гг. [25] в Республике Беларусь планировалось строительство 5,6 МВт новых электрических мощностей с использованием энергии биомассы.

Таблица 1

Общая информация о мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь
General information about mini-thermal power plants on local fuels in the Republic of Belarus

Наименование объекта	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Топливо	Технология выработки электроэнергии	Источник
Мини-ТЭЦ, г. Лунинец	4,7	72,6	Щепа	ПСУ	[11, 12]
Мини-ТЭЦ, г. п. Барань	3,25	16,5	Щепа / торф	ОРЦ	[11, 13]
Мини-ТЭЦ, г. Речица	4,2	19,6	Торф	ОРЦ	[11, 14]
Мини-ТЭЦ, г. Петриков	1,2	7,5	Щепа	ПСУ	[15]
Мини-ТЭЦ, г. Пружаны	3,7	13,8	Щепа / торф	ПСУ	[11, 16]
Мини-ТЭЦ Вилейка	2,4	16	Щепа	ПСУ	[16, 17]
Мини-ТЭЦ, г. Калинковичи	1,39	6,5	Щепа	ПСУ	[15, 18]
Мини-ТЭЦ, г. Волковыск	1,3	8	Щепа	ПСУ	[15]
Мини-ТЭЦ, Сосны	1,3	5,5	Щепа	ОРЦ	–
Осиповическая мини-ТЭЦ	1,2	н/д	Древесина / торф	ПСУ	[11, 19]
Мини-ТЭЦ ОАО «ФандОК», г. Бобруйск	1,6	н/д	Отходы производства	ПСУ	[20]
Мини-ТЭЦ, г. Пинск	2,7	4	Древесина	ПСУ	[20–22]
Мини-ТЭЦ, г. Ореховск	1,5	н/д	Древесина / торф	ПСУ	[20, 23]
Мини-ТЭЦ ОАО «Мостодрев»	2,4	н/д	Древесина	ПСУ	[20, 24]

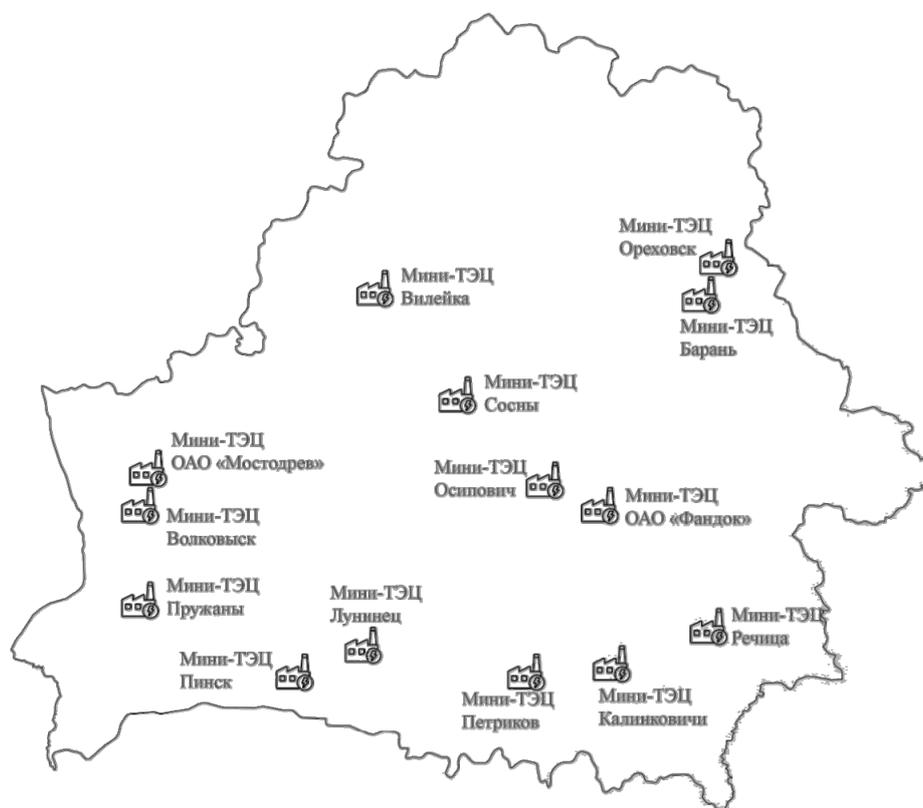


Рис. 1. Распределение мини-ТЭР на МВТ на карте Республики Беларусь

Fig. 1. Distribution of mini-thermal power plants on local fuels on the map of the Republic of Belarus

Интерес также представляют данные ГПО «Белэнерго» [26], отражающие генерацию электроэнергии за период 2020–2022 гг. энер-

гоисточниками на ВИЭ, подключенными к электрическим сетям объединенной энергосистемы (табл. 2).

Таблица 2

Изменение мощности и выработки электроэнергии блок-станциями, работающими на ВИЭ и подключенными к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго» за период 2020–2022 гг.

Changes in power and electricity production of block stations operating on renewable energy sources and connected to the power grids of energy supply organizations of the State Production Association “Belenergo” for the period 2020–2022

Блок-станция, работающая на ВИЭ	Показатель блок-станции, единица измерения	Период времени			Изменение (рост, падение) 2022 г./2021 г.	
		2020 г.	2021 г.	2022 г.	нат. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7
Солнечная энергия	$W_{уст}^1$, МВт	160,3	163,4	272,8	109,40	66,95
	$T_{уст}^2$, ч/год	1093	1064	765	-298,62	-28,07
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	175,2	173,8	208,7	34,90	20,08
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	174,7	173,3	204,1	30,80	17,77
Ветроэнергетика	$W_{уст}^1$, МВт	102,7	104,2	109,3	5,10	4,89
	$T_{уст}^2$, ч/год	1668	1465	1453	-12,57	-0,86
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	171,3	152,7	158,8	6,10	3,99
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	165,7	148,2	154,2	6,00	4,05
		96,7	97,05	97,10	0,05	0,05

1	2	3	4	5	6	7
Гидроэнергетика	$W_{уст}^1$, МВт	7,7	7,7	7,6	-0,10	-1,30
	$T_{уст}^2$, ч/год	3494	3390	3474	84,07	2,48
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	26,9	26,1	26,4	0,30	1,15
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	26,6	25,8	26,1	0,30	1,16
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Древесное топливо	$W_{уст}^1$, МВт	3,1	3,2	3,5	0,30	9,37
	$T_{уст}^2$, ч/год	1903	1656	1086	-570,54	-34,45
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	5,9	5,3	3,8	-1,50	-28,30
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	4,8	4,2	2,9	-1,30	-30,95
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Биогаз	$W_{уст}^1$, МВт	37,3	37	41,4	4,40	11,89
	$T_{уст}^2$, ч/год	5501	5535	4744	-791,17	-14,29
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	205,2	204,8	196,4	-8,40	-4,10
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	190,6	193,3	182,9	-10,40	-5,38
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Биомасса	$W_{уст}^1$, МВт	80	76	76	0,00	0,00
	$T_{уст}^2$, ч/год	3286	4364	4192	-172,37	-3,95
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	262,9	331,7	318,6	-13,10	-3,95
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	51,9	68,4	73,9	5,50	8,04
		1,9	2	2	0,00	0,00
Иные возобновляемые источники	$W_{уст}^1$, МВт	0,5	0,5	0,5	0,00	0,00
	$T_{уст}^2$, ч/год	4000	4200	4000	-200,00	-4,76
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	2	2,1	2	-0,10	-4,76
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	1,9	2	2	0,00	0,00
		95,0	95,2	100,0	4,76	5,00
Всего	$W_{уст}^1$, МВт	391,6	392	511,1	119,10	30,38
	$T_{уст}^2$, ч/год	2169	2287	1790	-497,32	-21,75
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	849,4	896,5	914,7	18,20	2,03
	$E_{отп}^4$, ГВт·ч	616,3	615,2	646,1	30,90	5,02

Примечания: $W_{уст}$ – установленная мощность, МВт; $T_{уст}$ – число часов использования установленной мощности, ч/год; $E_{год}$ – выработка электроэнергии, всего, ГВт·ч; $E_{отп}$ – поставка электроэнергии в сеть РУП-облэнерго, ГВт·ч.

Следует иметь в виду, что представленные данные не учитывают генерирующие мощности на ВИЭ по объектам организаций Министерства энергетики Республики Беларусь, в составе 24 ГЭС установленной мощностью 88,105 МВт и одной ветроэнергетической станции установ-

ленной мощностью 9 МВт (6 ветрогенераторов по 1,5 МВт каждый). Особое внимание нужно обратить на число часов использования установленной мощности, определенных авторами при анализе вышеуказанных данных. Явное преимущество имеют энергоисточники на ор-

ганических отходах, биомассе и гидроресурсах, для которых этот показатель значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики. Кроме того, генерирующие мощности на биомассе имеют наименьший коэффициент поставки электроэнергии в объединенную энергетическую систему.

В [3] приведена информация об энергетической стратегии и динамике структуры ТЭР Эстонии, Финляндии и Дании. Можно отметить, что общим для энергетических систем данных стран является то, что в условиях отсутствия значительных запасов нефти, природного газа, а также высокого потенциала для развития гидроэнергетики свое развитие в области теплоснабжения получила централизованная система теплоснабжения и теплофикация с генерацией энергии из твердой биомассы. И с этой точки зрения наиболее интересным для нас является опыт энергетики Финляндии, чья энергетическая стратегия подразумевает увеличение доли ТЭЦ на МВт. Во-первых, в этой стране доля ядерной энергии в структуре выработки электрической энергии в 2021 г. составляла 33 % и, как ожидается, вырастет до 40 % [27]. В Беларуси, как отмечалось ранее в [3], планируется примерно такая же доля выработки электрической энергии на АЭС. Во-вторых, в Финляндии, так же как в Республике Беларусь, имеются большие запасы древесины, а также хорошо развитая деревообрабатывающая промышленность. Обе страны стремятся к сокращению доли природного газа в структуре ТЭР: Финляндия для достижения поставленных целей по декарбонизации экономики, а Республика Беларусь в целях повышения энергетической безопасности и диверсификации структуры ТЭР. В то же время, рассмотренные в [3] страны отличаются своими возможностями по использованию солнечной и ветровой энергетики. Беларусь из-за своего географического расположения не имеет значительного потенциала по использованию этих видов энергии. Следовательно, в рамках выбора возобновляемых видов энергии (солнечной, гидро-, ветровой, геотермальной и биомассы) для нас наиболее перспективной является биомасса, что подтверждается анализом данных табл. 2. Явное преимущество по критерию использования установленной мощности имеют энергоисточ-

ники на биогазе (около 5000 ч/год), органических отходах и биомассе (свыше 4000 ч/год) и гидроресурсах (около 3500 ч/год), для которых этот показатель значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики.

После ввода в эксплуатацию двух блоков АЭС в Республике Беларусь возникнет профицит электрической энергии в структуре энергетического баланса страны [8]. В связи с этим строительство новых мини-ТЭЦ кажется слишком дорогим и нецелесообразным. Вместе с тем в [28] указывается, что удельный расход условного топлива на производство электрической энергии на существующих мини-ТЭЦ составляет 164,2–189,1 г у. т./кВт·ч, что на 20 % ниже общего значения по энергосистеме. При этом стоимость капитальных вложений при строительстве мини-ТЭЦ на МВт зависит от выбранной технологии выработки электрической энергии, а также установленной электрической мощности и, согласно различным источникам, варьируется в диапазоне от 1500 евро/кВт [29] до 3000 евро/кВт электрической мощности (при газификации биомассы) [29, 30]. Важным фактором, влияющим на результаты расчета экономической эффективности, является соотношение стоимости природного газа к стоимости биомассы, изменение которого непостоянно и, как следствие, достаточно трудно прогнозируемо в долгосрочной перспективе. При этом следует помнить, что деньги, на которые закупается биомасса, работают на поддержание внутреннего рынка, а не уходят за границу в виде иностранной валюты, как, например, это происходит при закупке импортного природного газа. Таким образом, капитальные вложения в строительство мини-ТЭЦ могут оказаться оправданными даже без введения существенных дополнительных повышенных тарифов на генерацию ВИЭ, которые могли бы отразиться на тарифах для потребителей.

При этом одним из главных преимуществ при обосновании целесообразности строительства мини-ТЭЦ в Финляндии [3] является наличие в стране собственного производства необходимого оборудования. Например, мини-ТЭЦ в Пружанах построена в основном с использованием оборудования, поставляемого из данной страны. Однако за последние годы в Республике Беларусь также было налажено произ-

водство части необходимого оборудования. Это касается, в первую очередь, котельного оборудования. Увеличение доли собственного производства необходимого оборудования значительно снижает капитальные затраты при строительстве мини-ТЭЦ на МВТ, способствует созданию новых рабочих мест, развитию в стране новых технологий, а также сокращает затраты на транспортировку оборудования, в результате чего привлекательность инвестиций в мини-ТЭЦ значительно увеличится.

Помимо этого, в районах, отдаленных от АЭС и других крупных энергоисточников, возможно возникновение так называемых «узких мест», где потери при транспорте электроэнергии слишком велики, а степень надежности и качества энергоснабжения недостаточна, особенно при чрезвычайных обстоятельствах. Исследование электрических сетей Республики Беларусь на предмет идентификации таких мест – предмет отдельной работы, подразумевающий проведение анализа существующих сетей, а также пространственного анализа (GIS-анализа) существующих генерирующих мощностей и доступных видов топлива. Аналогично следует выполнить оценку пропускной способности тепловых сетей в определенных ранее «узких» местах, исходя из которой можно осуществлять определение плотности распределения и мощности мини-ТЭЦ, например по методологии, приведенной в работе [31] на примере китайского региона Фуцзинь.

В дополнение ко всему изложенному выше можно отметить, что на сегодняшний день в мире наблюдается повышенный интерес к ВИЭ, который проявляется в том, что инвестиции в ВИЭ в 2022 г. значительно превышают инвестиции в традиционные источники энергии, использующие ископаемые виды топлива [32], а вместе с этим наблюдается тренд к электрификации промышленности, транспорта и других отраслей экономики. При этом неизбежно возникают проблемы в балансировке производства и потребления электрической энергии в течение суток, а также в поддержании максимальной энергетической эффективности генерации. Мини-ТЭЦ, работающие на МВТ, могут участвовать в решении обозначенных проблем. Комбинированная выработка сама по себе является наиболее эффективной

технологией выработки энергии. А при интеграции на них аккумуляторов теплоты могут участвовать в сглаживании неравномерности суточного графика потребления энергии. В качестве альтернативы аккумуляторам теплоты электрическая энергия, вырабатываемая на мини-ТЭЦ, может быть использована для производства «зеленого» водорода, рассматриваемого большим количеством стран в качестве промежуточного энергоносителя в промышленности и энергетике [33], или «зеленого» синтетического природного газа, получаемого путем реализации реакции водорода и углекислого газа, извлекаемого из продуктов сгорания. Производство водорода на мини-ТЭЦ на МВТ возможно при интеграции в схему энергоисточника блока электролизеров или путем интеграции технологий термохимического производства водорода. Возможные варианты схем мини-ТЭЦ на МВТ с опцией производства водорода термохимическим методом представлены в работе [34]. Углекислый газ, необходимый для производства «зеленого» природного газа, может быть получен путем улавливания CO_2 из продуктов сгорания. Сравнительный анализ коммерчески доступных технологий улавливания углекислоты приведен в [35]. Таким образом, мини-ТЭЦ на МВТ будет являться предприятием с отрицательными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, работающим по энергетически более эффективной схеме комбинированной выработки энергии, способствующим сокращению использования импортного природного газа, а также участвующим в балансировке графиков производства и потребления энергии. Кроме того, сегодня в экономике возникают интеграционные тенденции в рамках смежных отраслей и, как следствие, возникает потребность в более гибких энергетических системах. В этих условиях мини-ТЭЦ на МВТ может выступить как центр локальной мультиэнергетической системы (энергетического хаба) [36, 37].

Подводя итог, сформулируем технико-экономические «факторы привлекательности» строительства теплофикационных систем теплоснабжения на МВТ в условиях Беларуси:

- замещение импортируемого топлива (природного газа и нефти);
- повышение качества и надежности энергообеспечения потребителей в удаленных точках объединенной энергетической системы;

– развитие теплофикации и полигенерации (дополнительное производство таких продуктов, как холод, диоксид углерода, водород, синтетический природный газ);

– снижение потерь электрической энергии на ее транспорт;

– возможность генерации и выдачи электроэнергии в электрическую сеть по графику, задаваемому энергосистемой;

– возможность создания на базе мини-ТЭЦ энергетического хаба, структурированного под интеграцию энергетических подотраслей, источников распределенной генерации и опцию генерации «зеленых» энергоносителей.

ВЫВОДЫ

1. В статье на основе анализа открытых источников представлена информация по состоянию применения местных видов топлива в системах централизованного теплоснабжения Республики Беларусь и ряда европейских стран, имеющих опыт в широком использовании твердой биомассы. Систематизирована информация о функционирующих в нашей стране мини-ТЭЦ на МВТ с указанием мест их расположения, электрической и тепловой мощности, технологий выработки электрической энергии, часов использования установленной мощности.

2. Показано, что строительство новых мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь целесообразно в рамках создания новых и модернизации существующих систем централизованного теплоснабжения, но эффективность строительства в каждом конкретном случае должна подтверждаться результатами комплексного технико-экономического обоснования, выполняемого с учетом как прямых, так и косвенных факторов, включающих анализ потерь в электрических сетях, возможностей топливной инфраструктуры, топологии и параметры существующих тепловых сетей, возможности работы по графику электрических нагрузок, складывающемуся в энергосистеме. Отмечено, что для снижения капитальных затрат при строительстве мини-ТЭЦ на МВТ необходимо продолжить локализацию производства нужного для их строительства оборудования на территории Республики Беларусь и создания на базе мини-ТЭЦ локальных интеграционных энерге-

тических хабов с опцией производства «зеленых» энергоносителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виктор Каранкевич: «С вводом АЭС доля природного газа в энергобалансе Беларуси снизится до 60 %» [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Респ. Беларусь. 2022. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175. Дата доступа: 01.06.2023.
2. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/dfiles/000608_512413_Kontseptsiya.pdf.
3. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>.
4. Об одобрении Концепции энергетического развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Респ. Беларусь, 25 фев. 2020 г., № 7. Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/Postanovlenie-7.pdf>.
5. Парижское климатическое соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 10.06.2023.
6. Иванов, Д. Л. Экстремально высокие темпы роста температуры воздуха как характерная черта и особенность климата территории Беларуси в условиях глобального потепления. / Д. Л. Иванов, Е. А. Ивашко // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Минск: БГУ, 2021. С. 329–332.
7. Войтов, И. В. Современное состояние и перспективы использования древесного топлива в Республике Беларусь / И. В. Войтов, А. В. Ледницкий // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 9–14.
8. Романюк В. Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2015. № 6 (87). С. 3–7.
9. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 фев. 2021 г., № 103. Pravo.by. Режим доступа: <https://pravo.by/documment/?guid=3871&p0=C22100103>.
10. Belarus energy profile [Electronic Resource]. IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile>. Date of access: 20.05.2023.
11. Установленная мощность [Электронный ресурс] // Белэнерго. 2023. Режим доступа: <https://www.energo.gov.by/>.

- by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli/ustanovlennaya-moshchnost/index11.php. Дата доступа: 26.05.2023.
12. Писарев, В. Лунинецкая ТЭЦ: тепло, еще теплее! / В. Писарев // Энергетика Беларуси. 2015. № 25 (331). 28 дек. С. 1.
 13. Турченко, А. Мини-ТЭЦ «Барань» работает без сбоев / А. Турченко // Энергетика Беларуси. 2014. № 3 (285). 14 фев. С. 2.
 14. Мини-ТЭЦ в Речице: опыт, достойный подражания // Энергетика Беларуси. 2016. № 20 (351). 27 окт. С. 1.
 15. Об утверждении Государственной программы строительства энергоисточников на местных видах топлива в 2010–2015 годах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 19 июля 2010 г., № 1076 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2010. № 5/32215.
 16. Малая энергетика в ближайшие годы в Беларуси получит более широкое развитие [Электронный ресурс]. 2009. Режим доступа: <http://government.by/ru/content/341/print>. Дата доступа: 26.05.2023.
 17. Оганезов, И. А. Перспективы использования древесных видов топлива в аграрных районах Республики Беларусь / И. А. Оганезов, В. В. Ширшова // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2010 г.: в 2 ч. Минск: БГАТУ, 2010. Ч. 2. С. 74–77.
 18. Мини-ТЭЦ на местных видах топлива открылась в Калинковичах [Электронный ресурс]. 2019. Режим доступа: <https://www.belta.by/regions/view/mini-tets-na-mestnyh-vidah-topliva-otkrylas-v-kalinkovichah-334689-2019>. Дата доступа: 15.05.2023.
 19. Могилевское республиканское унитарное предприятие электроэнергетики «Могилевэнерго» – партнер МОФФ [Электронный ресурс]. 2021. Режим доступа: <http://www.moff.by/mogilevskoe-respublikanskoe-unitarnoe-predpriyatie-elektroenergetikimo-gilevenergo-partner-moff-3/#:~:text=>. Дата доступа: 20.05.2023.
 20. Возобновляемая энергетика [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <https://investinbelarus.by/docs/Renuable.pdf>. Дата доступа: 18.04.2023.
 21. Об утверждении Государственной комплексной программы модернизации основных производственных фондов белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов на период до 2011 года: Указ Президента Республики Беларусь, 15 ноября 2007 г., № 575. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2017. № 1/9095.
 22. Богдан, Е. В. Мини-ТЭЦ на местных видах топлива в Беларуси / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сб. материалов I Всероссийской науч.-практ. конф. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2014. С. 12.
 23. Первенец отечественной энергетике [Электронный ресурс]. 2008. Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/pervenets-otechestvennoy-energetiki.html>. Дата доступа: 20.05.2023.
 24. Проекты [Электронный ресурс] // Возобновляемая энергетика и ресурсы. Режим доступа: <https://energy-aven.org/projects>. Дата доступа: 11.06.2023.
 25. Установлены объемы квот на создание установок по использованию ВИЭ на 2021–2023 годы [Электронный ресурс]. 2020. Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/press/novosti/ustanovleny-obemy-kvot-na-sozdanie-ustanovok-po-ispolzovaniyu-vie-na-2021-2023-gody/>. Дата доступа: 09.06.2023.
 26. Возобновляемая энергетика. [Электронный ресурс] // Белэнерго. Режим доступа: <https://energo.by/content/investoram/vozobnovlyаемая-energetika/>. Дата доступа: 02.08.2023.
 27. Finland 2023. Energy Policy Review [Electronic Resource] / IEA. 2023. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/07c88e41-c17b-4ea1-b35d-85dff665de4/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf>. Date of access: 07.07.2023.
 28. Короткевич, М. А., Старжинский А. Л. Анализ технических параметров, количества и места подключения генерирующих устройств малой мощности, работающих на местных видах топлива [Электронный ресурс] / М. А. Короткевич, А. Л. Старжинский // Энергетика Беларуси-2022: материалы респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2022. С. 18–25.
 29. IEA. Biomass for Power Generation and CHP [Electronic Resource] // IEA Energy Technology Essentials. 2007. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf>. Date of access: 18.07.2023.
 30. Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco / D. Sánchez-Lozano [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No 10. P. 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
 31. Zhang, Y. Effects of the Distribution Density of a Biomass Combined heat and Power Plant Network on Heat Utilisation Efficiency in Village–Town Systems / Y. Zhang, J. Kang // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 202, Part. 1. P. 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.019>.
 32. World Energy Investment 2023 [Electronic Resource] / IEA. 2023. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf>. Date of access: 11.07.2023.
 33. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 3: Водород в качестве топлива для энергетических систем / В. А. Седнин [и др.] // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 16–21.
 34. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
 35. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.

36. Герасимов, Д. О. Системы имитационного моделирования мультиэнергетических объектов / Д. О. Герасимов, К. В. Суслов // Вестник КГЭУ. 2020. Т. 12, № 4 (48). С. 11–19.
37. Klemm, K. Modeling and Optimization of Multi-Energy Systems in Mixed-Use Districts: A Review of Existing Methods and Approaches / C. Klemm, P. Vennemann // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 135. Art. 110206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206>.

Поступила 20.06.2023

Подписана в печать 25.08.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

- Victor Karankevich: “With the Commissioning of the Nuclear Power Plant the Share of Natural gas in the Energy Balance of Belarus Will Decrease to 60 %”. *Ministry of Energy of the Republic of Belarus* 2022. Available at: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energo-balanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175 (accessed 01 June 2023) (in Russian).
- On Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No 1084*. Available at: https://minenergo.gov.by/dfiles/000608_512413_Kontseptsija.pdf. (in Russian).
- Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1: State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian).
- On Approval of the Concept of Energy Development of Electricity Generating Capacities and Electrical Networks for the Period until 2030: Resolution of the Ministry of Energy, February 25, 2020, No 7*. Available at: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/Postanovlenie-7.pdf> (in Russian).
- Paris Climate Agreement Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/> (accessed 10 June 2023) (in Russian).
- Ivanov D. L., Ivashko E. A. (2021) Extremely High Growth Rates of Air Temperature as a Characteristic Feature and Peculiarity of the Climate of the Territory of Belarus in the Context of Global Warming. *Razvitie Geograficheskikh Issledovaniy v Belarusi v XX–XXI Vekakh* [Development of Geographical Research in Belarus in the 20th–21st Centuries]. Minsk, Belarusian State University, 329–332 (in Russian).
- Voytov I. V., Lednitsky A. V. (2017) Current state and Prospects for the Use of Wood Fuel in the Republic of Belarus. *Lesozagotovitel'noe Proizvodstvo: Problemy i Resheniya: Mat. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 26–28 Aprelya 2017* [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Minsk, April 26–28, 2017]. Minsk, Belarusian State Technological University, 9–14 (in Russian).
- Romanyuk V. N., Bobich A. A. (2015) On the Issue of Diversifying Options for Regulating the Generation Capacity of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (6), 3–7 (in Russian).
- About the State Program “Energy Saving” for 2021–2025: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 24, 2021, No. 103. *Pravo.by*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (in Russian).
- IEA (2020). *Belarus Energy Profile*. Available at: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile> (accessed 20 May 2023).
- Installed Power. *Belenergo*. 2023. Available at: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli/ustano-vlennaya-moshchnost/index.11.php> (accessed 26 May 2023) (in Russian).
- Pisarev V. (2015, December 28) Luninetskaya Thermal Power Plant: Warm, Even Warmer! *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (25), 1 (in Russian).
- Turchenko A. (2014, February 14) Mini-Thermal Power Plant “Baran” Operates Without Failures. *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (3), 2 (in Russian).
- Mini-Thermal Power Plant in Rechitsa: Experience Worthy of Imitation. (2016, October 27) *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (20), 1 (in Russian).
- On Approval of the State Program for the Construction of Energy Sources Using Local Fuels in 2010–2015: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, July 19, 2010, No. 1076. (2010) *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*, (5/32215) (in Russian).
- Small-Scale Energy Will Receive Wider Development in Belarus in the Coming Years*. (2009). Available at: <http://government.by/ru/content/341/print> (accessed 26 May 2023) (in Russian).
- Oganezov I. A., Shirshova V. V. (2010) Prospects for the Use of Wood Fuels in Agricultural Areas of the Republic of Belarus. *Nauchno-Innovatsionnaya Deyatel'nost' v Agropromyshlennom Komplekse: Sb. Nauch. St. 4-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 20–21 Maya 2010 g. Ch. 2* [Scientific and Innovative Activities in the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Papers of the 4th International. Scientific and Practical Conference, Minsk, 20–21 May 2010. Part 2]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 74–77 (in Russian).
- Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels Has Been Opened in Kalinkovichi*. (2019). Available at: <https://www.belta.by/regions/view/mini-tets-na-mestnyh-vidah-topliva-otkrylas-v-kalinkovichah-334689-2019> (accessed 15 May 2023) (in Russian).
- Mogilev Republican Unitary Enterprise of Electric Power “Mogilevenergo” is a Partner of Mogilev Regional Football Federation*. (2021). Available at: [Наука
и техника. Т. 22, № 6 \(2023\)
Science and Technique. V. 22, No 6 \(2023\)](http://www.moff.by/mogilevskoe-respublikanskoe-unitarnoe-predpriyatie-elektroenergetikimo-gilevenergo-partner-moff-3/#:~:text=(accessed 20 May 2023) (in Russian).

</div>
<div data-bbox=)

20. *Renewable Energy*. (2015). Available at: <https://investinbelarus.by/docs/Renuable.pdf>. (accessed 18 April 2023) (in Russian).
21. On the Approval of the State Comprehensive Program for the Modernization of Main Production Assets of the Belarusian Energy Conservation and Increasing the Share of Use of the Republic's Own Fuel and Energy Resources for the Period Until 2011: Decree of the President of the Republic of Belarus, November 15, 2007, No 575. (2017) *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*, (1/9095) (in Russian).
22. Bogdan E. V., Karnitsky N. B. (2014) Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in Belarus. *Energetika i Energoberezhenie: Teoriya i Praktika: Sb. Materialov I Vserossiiskoi Nauch.-Prakt. Konf.* [Energy and Energy Saving: Theory and Practice. Collection of Materials of the I All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, 12 (in Russian).
23. *The First-Born of Domestic Energy*. (2008). Available at: <https://www.sb.by/articles/pervenets-otechestvennoy-energetiki.html> (accessed 20 May 2023) (in Russian).
24. Projects. *Renewable Energy and Resources*. Available at: <https://energy-aven.org/projects> (accessed 11 June 2023) (in Russian).
25. *The Volume of Quotas for the Creation of Installations for the use of Renewable Energy Sources Has Been Established for 2021–2023*. (2020). Available at: <https://minenergo.gov.by/press/novosti/ustanovleny-obemy-kvot-na-sozdanie-ustanovok-po-ispolzovaniyu-vie-na-2021-2023-gody/> (accessed 09 June 2023) (in Russian).
26. Renewable Energy. *Belenergo*. Available at: <https://energo.by/content/investoram/vozobnovlyaemaya-energetika/> accessed 02 August 2023) (in Russian).
27. IEA (2023). *Finland 2023. Energy Policy Review* Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/07c88e41-c17b-4ea1-b35d-85dff665de4/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf> (accessed 07 July 2023).
28. Korotkevich M. A., Starzhinsky A. L. (2022) Analysis of Technical Parameters, Number and Location of Connection of Low-Power Generating Devices Operating on Local Fuels. *Energetika Belarusi-2022: Mat. Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 25–26 Maya 2022 g.* [Energy of Belarus-2022: Proceedings of Republican Scientific and Practical Conference, May 25–26, 2022] J. Minsk, Belarusian National Technical University] Publishing House, 18–25 (in Russian).
29. IEA (2007) *Biomass for Power Generation and CHP*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf> (accessed 18 July 2023) (in Russian).
30. Sánchez-Lozano D., Escámez A., Aguado R., Oul-bi S., Hadria R., Vera D. (2023) Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco. *Applied Sciences*, 13 (10), 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
31. Zhang Y., Kang J. (2017) Effects of the Distribution Density of a Biomass Combined Heat and Power Plant Network on Heat Utilisation Efficiency in Village–Town Systems. *Journal of Environmental Management*, 202 (Part. 1), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.019>.
32. IEA (2023) *World Energy Investment 2023*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf> (accessed 11 July 2023).
33. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Kuz'mich K. A., Ivanchikov E. O. (2021) The Place of Hydrogen in Modern Energy Technology Metasystems. Part 3. Hydrogen as a Fuel for Energy Systems. *Energoeffektivnost [Energy Efficiency]*, (5), 16–21 (in Russian).
34. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
35. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
36. Gerasimov D. O., Suslov K. V. (2020) Simulation systems for Multi-Energy Facilities. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 11–19 (in Russian).
37. Klemm K., Vennemann P. (2021). Modeling and Optimization of Multi-Energy Systems in Mixed-Use Districts: A Review of Existing Methods and Approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206>.

Received: 20.06.2023

Accepted: 25.08.2023

Published online: 30.11.2023