



**СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СОВМЕСТНО С
КОТЕЛЬНЫМИ НА НУЖДЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ
АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)**

А.В. Бежан¹, Ю.Н. Звонарева², Р.А. Пономарев²

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера - филиал ФГБУН
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской
академии наук», г. Апатиты, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4602-5161>, a.bezhan@ksc.ru

Резюме: В современной России важным условием стабильного развития и дальнейшего существования удаленных районов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является обеспечение комфортных условий проживания местного населения. Особая роль в этом процессе отведена системам теплоснабжения, надежная и бесперебойная работа которых сопряжена с различными проблемами. Основные проблемы связаны с повышенными денежными расходами на покупку органического топлива и его завоз в удаленные районы. Данное обстоятельство приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому их дальнейшее существование без государственных субсидий становится не возможным. В этих условиях в удаленных районах с повышенным потенциалом ветра одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии, может быть использование ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с котельными на нужды теплоснабжения. **ЦЕЛЬ.** На примере Мурманской области показать, что использование ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах является хорошим решением для снижения себестоимости тепловой энергии. **МЕТОДЫ.** Сравнение себестоимости тепловой энергии при теплоснабжении только от котельных и при использовании ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что использование ВЭУ совместно с котельными мощностью более 0,1 Гкал/ч на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива стоимостью 25000-72000 руб/т у.т. и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%. Для котельных меньшей мощности эффект от использования ВЭУ снижается, причем чем меньше мощность котельной, тем больше использование ВЭУ оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты позволяют оценить перспективы использования ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах АЗРФ с точки зрения эффективности такого использования.

Ключевые слова: ветроэнергетика; теплоснабжение; себестоимость тепловой энергии; технико-экономическая оценка; Арктическая зона Российской Федерации.

Благодарности: Основные результаты исследования получены в рамках выполнения – гос. задания №075-03-2023-91 от 16.01.2023 и гос. задания №FMEZ-2022-0014.

Для цитирования: А.В. Бежан, Ю.Н. Звонарева, Р.А. Пономарев. Снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах арктической зоны российской федерации (на примере Мурманской области) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 128-138. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-128-138.

REDUCTION OF THE PRIME COST OF THERMAL ENERGY BY THE UTILIZATION OF WIND POWER PLANTS IN CONJUNCTION WITH BOILER HOUSES FOR HEAT SUPPLY IN REMOTE AREAS OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION (ON THE EXAMPLE OF THE MURMANSK REGION)

AV. Bezhan¹, YuN. Zvonareva², RA. Ponamarev²

¹Northern Energetics Research Centre - Branch of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

a.bezhan@ksc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4602-5161>, a.bezhan@ksc.ru

Abstract: Providing comfortable living conditions of the local community is the important condition of the stable development and continued existence of remote areas of the Arctic Zone of the Russian Federation (AZRF) in modern Russia. The particular role played in this process is assigned to heat supply systems whose reliable and uninterrupted operation is fraught with various problems. The main ones are related to increased costs for the purchase of organic fuel and its delivery to remote areas. This circumstance leads to the fact that the prime cost of thermal energy is higher than the rates level, resulting in unprofitable activity of heat generating facilities, so their continued existence becomes impossible without government subsidies. Under these conditions one of the ways to save imported organic fuel and therefore reduce the prime cost of thermal energy can be the utilization of wind power plants (WPPs) in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas with increased wind potential. **THE PURPOSE.** It should be shown on the example of the Murmansk region that the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas is a good decision to reduce the prime cost of thermal energy. **METHODS.** The comparison of the prime cost of thermal energy in a case of heat supply only from boiler houses with the one when utilizing WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply. **RESULTS.** It is shown that the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses with a capacity of more than 0.1 Gcal/h for heat supply in remote areas of the Murmansk region saves 60-90% of organic fuel worth 25,000-72,000 rubles/tce at boiler houses and thereby reduces the prime cost of thermal energy by 10-60%. An effect of the utilization of WPPs is reduced for boiler houses of lower capacity, with the lower the boiler house capacity, the more the utilization of WPP being economically impractical compared to a case of heat supply only from a boiler house. **CONCLUSION.** The results obtained allow us to assess the prospects of the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas of AZRF in terms of the effectiveness of such utilization.

Keywords: wind energy; heat supply; cost of thermal energy; feasibility study; Arctic zone of the Russian Federation.

Acknowledgments: The main results of the study were obtained in the framework of the implementation - state. tasks No. 075-03-2023-91 dated 01.16.2023 and state. tasks No. FMEZ-2022-0014.

For citation: Khusnutdinov RR, Mozhukhi GV, Khusnutdinova NR, Salakhutdinov BM. Reduction of the prime cost of thermal energy by the utilization of wind power plants in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas of the arctic zone of the russian federation (on the example of the Murmansk region). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3): 128-138. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-128-138.

Введение (Introduction)

В современной России важным условием стабильного развития и дальнейшего существования районов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является обеспечение комфортных условий проживания местного населения. Особая роль в этом процессе отведена системам теплоснабжения, надежная и бесперебойная работа которых сопряжена с различными проблемами. Особенно остро это проявляется в удаленных районах АЗРФ, где имеется множество потребителей тепловой энергии, испытывающих

различные трудности с организацией теплоснабжения. Прежде всего, это связано с суровыми природно-климатическими условиями, усложняющими доставку органического топлива в удаленные районы и являющимися причиной повышенных потребностей в тепловой энергии на протяжении продолжительного отопительного периода, достигающего в отдельных районах АЗРФ 9 месяцев и более. Вместе с этим удаленность потребителей от мест добычи органического топлива, конечная стоимость которого у потребителей может быть в несколько раз выше по сравнению с отпускной ценой у поставщиков, является основной причиной повышенных денежных расходов на покупку такого топлива и его завоз в удаленные районы [1]. Данное обстоятельство приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому государство вынуждено субсидировать покупку и завоз органического топлива в удаленные районы АЗРФ [2]. В такой ситуации хорошим решением для экономии органического топлива и сокращения субсидий на его покупку, может быть максимальное использование местных возобновляемых источников энергии [3].

В районах АЗРФ с повышенным потенциалом ветра имеется возможность использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с котельными, работающими на дорогом привозном органическом топливе, на нужды теплоснабжения [4-7]. Одним из таких районов является Мурманская область, которая расположена в северо-западной части АЗРФ. Исследования [8-11] показали, что наибольшие среднегодовые скорости ветра в Мурманской области наблюдаются в прибрежных районах Баренцева и Белого морей и составляют 5-9 м/с на высоте 10 метров от поверхности земли. При этом наибольшие значения скорости ветра отмечаются в зимнее время, когда и существует наибольшая потребность в тепловой энергии [12]. Таким образом, можно констатировать, что в регионе складываются благоприятные условия для эффективного использования энергии ветра на нужды теплоснабжения для широкого круга удаленных потребителей.

Общая характеристика теплоснабжения удаленных потребителей Мурманской области

В зависимости от направления хозяйственной деятельности и производственных потребностей, социальных функций и объёмов теплопотребления в Мурманской области можно выделить следующие группы удалённых потребителей: маяки и метеостанции, объекты военного назначения, небольшие населенные пункты (н.п.). Теплоснабжение этих потребителей осуществляется в основном от котельных небольшой мощности или от простых огневых печей, работающих на дровах и угле. Максимальная тепловая нагрузка для одного потребителя в большинстве случаев не превышает 5 Гкал/ч (табл. 1).

Таблица 1
Тепловая нагрузка потребителей тепловой энергии, расположенных в удаленных районах Мурманской области

Table 1

The thermal load of thermal energy consumers located in remote areas of the Murmansk region

Название потребителя	Величина тепловой нагрузки для одного потребителя, Гкал/ч
Маяки и метеостанции	до 0.02
Объекты военного назначения	около 0.1-0.5
Небольшие н.п.	от 1-3 до нескольких десятков

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Мурманская область не имеет предприятий по добыче органических видов топлива (угля, нефти, газа). Поэтому для производства тепловой энергии преимущественно используется привозное органическое топливо, доставляемое из других регионов России. В основном это уголь и мазут, реже дизельное топливо и сжиженный газ (табл. 2). По состоянию на 2022 год стоимость такого топлива с учетом транспортных расходов после доставки потребителю в центральные промышленно развитые районы Мурманской области в среднем составляла 70000 рублей за тонну дизельного топлива, 23000 рублей за тонну мазута и 5000 рублей за тонну угля.

Необходимо отметить, что, начиная с апреля 2022 года, стоимость мазута в России имела тенденцию к уменьшению, что связано со снижением спроса со стороны зарубежных стран, главным образом ЕС и США, которые в марте 2022 года ввели эмбарго на нефтепродукты из России. В результате этого нефтеперерабатывающие заводы оказались под угрозой переполнения своих мазутных хранилищ и были вынуждены продавать мазут

по сниженным ценам. Можно предположить, что данная ситуация имеет временный характер и после стабилизации обстановки на мировом рынке нефтепродуктов стоимость мазута снова будет расти.

Совсем по-другому обстоит дело в удаленных районах, большинство потребителей тепловой энергии которых находится на побережье Баренцева и Белого морей, где автомобильные трасы плохо развиты, а железные дороги и вовсе отсутствуют. По этой причине в прибрежные районы топливо (в основном это дизельное топливо и мазут) доставляется по морю в период летней навигации, где морские суда производят поочередную отгрузку топлива всем населенным пунктам. Далее топливо доставляется от побережья во внутренние районы Мурманской области. Такая многоэтапная доставка органического топлива приводит к его удорожанию, конечная стоимость которого у потребителей в зависимости от их расположения может возрасти в среднем в 1,5 раза и составлять около 105000 руб/т за дизельное топливо и 35000 руб/т за мазут. В пересчете на условное топливо дизельное топливо и мазут будут стоить соответственно 72000 и 25000 руб/т у.т. Высокая стоимость топлива оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели работы котельных и приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов. Вместе с этим для котельных небольшой мощности свойственны низкий уровень автоматизации, высокие удельные расходы топлива на выработку тепловой энергии, а также низкий коэффициент полезного действия. Все это создает дополнительные финансовые проблемы, связанные с содержанием и обслуживанием таких котельных. Для оценки влияния этих факторов на себестоимость тепловой энергии была проведена серия расчетов для следующего мощностного ряда котельных: 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч.

Таблица 2

Структура потребления топлива (включая электроэнергию, затраченную на прямой нагрев воды) тепловыми электростанциями и котельными Мурманской области¹

Table 2

The structure of fuel consumption by thermal power plants and boiler houses of the Murmansk region (including electricity spent on the direct water heating)

Вид топлива	Газ сжиженный	Дизельное топливо	Мазут	Уголь	Дрова	Электроэнергия
Расход, т у.т.	256	1 740	1 388 542	329 908	1 613	56 946
Доля в топливном балансе, %	0,01	0,10	78,05	18,54	0,09	3,20

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчет себестоимости тепловой энергии на котельных

Годовые эксплуатационные расходы котельной $Z_{\text{год}}$ (руб/год) складываются из затрат на топливо $Z_{\text{т}}$, оплату труда $Z_{\text{сп}}$, амортизацию и текущий ремонт $Z_{\text{ка}}$, и прочих расходов $Z_{\text{пр}}$.

Топливная составляющая эксплуатационных расходов котельной может быть найдена по следующей формуле:

$$Z_{\text{т}} = (0,143 \cdot C_{\text{т}} \cdot Q_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}) / (\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пт}}), \quad (1)$$

где 0,143 – коэффициент перевода из Гкал в тонны условного топлива, т у.т./Гкал; $C_{\text{т}}$ – стоимость условного топлива, руб/т у.т.; $Q_{\text{к}}$ – установленная мощность котельной, Гкал/ч; $h_{\text{к}}$ – число часов использования установленной мощности котельной в году, ч; $\eta_{\text{к}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) котлов, ед.; $\eta_{\text{пт}} = 0,95$ – коэффициент, учитывающий потери топлива при транспортировке, разгрузке, хранении и других топливно-транспортных операциях для жидкого топлива, ед. [13].

Затраты на топливо сильно зависят от отпускной цены у поставщиков, удаленности потребителей и развития дорожно-транспортной системы. Для учета влияния этих факторов расчеты были проведены для двух вариантов стоимости условного топлива: 25000 и 72000 руб/т у.т.

В зависимости от назначения, режима работы и природно-климатических условий района расположения котельной число часов использования ее установленной мощности в

¹ Распоряжение Губернатора Мурманской области от 30.04.2021 №133-рг "Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Мурманской области на период 2022 - 2026 годов" // Опубликовано 30.04.2021 на официальном сайте Минэнерго и ЖКХ Мурманской области. <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/>

среднем может составлять 3000-4000 часов. В расчетах этот показатель принят на уровне 3500 часов.

КПД котлов зависит от многих факторов и приближенно может быть принят равным 0,6; 0,6; 0,65; 0,7; 0,7 и 0,75 для котельных, работающих на жидком топливе, соответственно мощностью 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч [14].

Ежегодные затраты на оплату труда включают в себя заработную плату обслуживающего персонала и отчисления на социальные нужды и математически могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$Z_{\text{Кэл}} = n_{\text{шт}} \cdot Q_{\text{К}} \cdot Z_{\text{п}} \cdot 12,$$

где $n_{\text{шт}}$ - штатный коэффициент обслуживающего персонала, чел./(\text{Гкал/ч}); $Z_{\text{п}}$ - месячная заработная плата и отчисления на социальные нужды одного работника котельной, руб/чел.; 12 - число месяцев в году, ед.

Штатный коэффициент зависит от тепловой производительности котельной и вида сжигаемого топлива и ориентировочно может быть определен в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3
Значения штатных коэффициентов для котельных, работающих на жидком топливе [15]

Table 3

The values of staff coefficients for boiler houses powered by liquid fuel [15]

Установленная мощность котельной, Гкал/ч	0,02	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
Штатный коэффициент, чел./(\text{Гкал/ч})	150	40	12	7	4	2,8

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Месячная заработная плата и отчисления на социальные нужды одного работника котельной в сумме принимались равным 115000 рублей, что соответствует средней месячной оплате труда работников по Мурманской области в 2022 году.

Затраты на амортизацию и текущий ремонт оборудования и строений можно определить по следующей формуле:

$$Z_{\text{Ка}} = N_{\text{Ка}} \cdot k_{\text{К}} \cdot Q_{\text{К}},$$

где $N_{\text{Ка}} = 0,1$ - средняя норма амортизационных отчислений по котельной от капиталовложений в ее строительство и монтаж, ед.; $k_{\text{К}}$ - удельные капиталовложения в котельную, работающую на жидком топливе, руб/(\text{Гкал/ч}).

В качестве исходных данных о величине капиталовложений в котельные была использована статистическая информация, полученная при обработке инвестиционных программ теплоснабжающих организаций Мурманской области по строительству, модернизации и реконструкции систем теплоснабжения, а также предложений ряда предприятий, занимающихся изготовлением и реализацией котельных, работающих на жидком топливе. Согласно полученным данным, удельные капиталовложения в такие котельные мощностью 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч составили соответственно 78.8; 31,6; 14,1; 10,6; 7,9 и 5,2 млн. руб/(\text{Гкал/ч}).

При расчете прочих расходов можно воспользоваться следующим равенством:

$$Z_{\text{Кпр}} = 0,2 \cdot (Z_{\text{Кэл}} + Z_{\text{Ка}}),$$

где 0,2 - коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов, принимаемый в размере 20% затрат на амортизацию, текущий ремонт и оплату труда.

Таким образом, зная все составляющие годовых эксплуатационных расходов котельной, можно определить себестоимость тепловой энергии, используя следующее выражение:

$$C_{\text{К}} = (Z_{\text{т}} + Z_{\text{Кэл}} + Z_{\text{Ка}} + Z_{\text{Кпр}}) / (Q_{\text{К}} \cdot h_{\text{К}}), \text{ руб/Гкал.}$$

На рисунке 1 представлены результаты расчетов себестоимости тепловой энергии на котельных в удаленных районах Мурманской области. Из рисунка видно, что на котельных мощностью более 1 Гкал/ч себестоимость тепловой энергии находится ниже 20000 руб/Гкал. Тогда как на более мелких котельных она возрастает почти до 90000 руб/Гкал. В этих условиях одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии на котельных, может быть использование ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения.

Расчет себестоимости тепловой энергии при использовании ветроэнергетических установок совместно с котельными

Основной эффект от использования ВЭУ совместно с котельной на нужды теплоснабжения можно пояснить следующим образом. Если теплоснабжение осуществляется только от котельной, то доля участия котельной в теплоснабжении равна единице ($\gamma = 1$). Использование ВЭУ совместно с котельной способствует тому, что доля участия котельной в теплоснабжении снижается ($\gamma < 1$), соответственно сокращается и расход органического топлива, используемого на котельной. С учетом сказанного формулу (1) можно представить в виде:

$$Z_{т+ВЭУ} = (0,143 \cdot \Pi_{г} \cdot Q_{к} \cdot h_{к} \cdot \gamma) / (\eta_{к} \cdot \eta_{пт}). \quad (2)$$

В [16] в результате обработки обширного материала, включающего в себя синхронные записи температуры наружного воздуха и скорости ветра – основных факторов, обуславливающих объемы теплопотребления, была получена аналитическая зависимость, определяющая участие котельной в теплоснабжении:

$$\gamma = \exp \left[-3,2 \cdot \left(\frac{V_{год}}{V_p} \right)^2 \cdot \beta \right], \quad (3)$$

где $V_{год}$ - среднегодовая скорость ветра на оси ветроколеса, м/с; V_p - расчетная скорость ветра на оси ветроколеса, м/с; $\beta = Q_{ВЭУ} / Q_{к}$ - соотношение мощностей ВЭУ и котельной, ед.

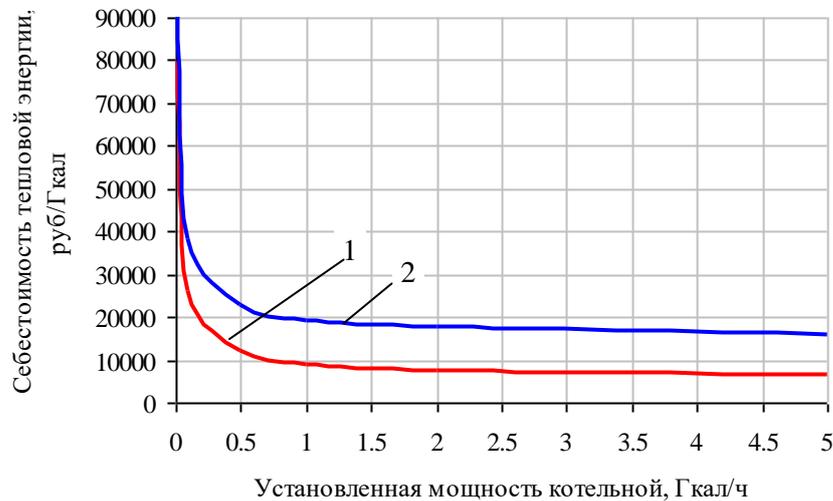


Рис. 1. Себестоимость тепловой энергии на котельных в удаленных районах Мурманской области при стоимости условного топлива: 1 – 25000 и 2 – 72000 руб/т у.т.

Fig. 1. The prime cost of thermal energy in boiler houses in remote areas of the Murmansk region at the cost of coal equivalent: 1 – 25,000 and 2 – 72,000 rubles/tce

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Подставляя (3) в (2), можно получить формулу для определения затрат на топливо при использовании ВЭУ совместно с котельной на нужды теплоснабжения:

$$Z_{т+ВЭУ} = (0,143 \cdot \Pi_{г} \cdot Q_{к} \cdot h_{к} \cdot \exp \left[-3,2 \cdot \left(\frac{V_{год}}{V_p} \right)^2 \cdot \beta \right]) / (\eta_{к} \cdot \eta_{пт}).$$

Годовые эксплуатационные расходы ВЭУ $Z_{ВЭУгод}$ (руб./год) в общем случае складываются из затрат на оплату труда $Z_{ВЭУзн}$, амортизацию и текущий ремонт $Z_{ВЭУа}$, и прочих расходов $Z_{ВЭУпр}$.

Для обслуживания ВЭУ потребуется один сотрудник, работающий на 1/2 ставки с заработной платой и отчислениями на социальные нужды $Z_{ВЭУзн} = 690000$ рублей в год (57500 рублей в месяц), что соответствует половине средней годовой оплате труда работников по Мурманской области в 2022 году.

Затраты на амортизацию и текущий ремонт можно определить по формуле:

$$Z_{ВЭУа} = N_{ВЭУам} \cdot k_{ВЭУ} \cdot Q_{ВЭУ},$$

где $N_{ВЭУам} = 0,07$ - средняя норма амортизационных отчислений для ВЭУ от капиталовложений в ее строительство и монтаж, ед.; $k_{ВЭУ}$ - удельные капиталовложения в ВЭУ, руб/(Гкал/ч), $Q_{ВЭУ}$ - установленная мощность ВЭУ, Гкал/ч.

Удельные капиталовложения современных ВЭУ мощностью от 0.02 до 5.0 Гкал/ч с учетом дополнительных расходов на транспортировку, сооружение и ввод в эксплуатацию находятся в диапазоне от 200 до 90 млн. руб/(Гкал/ч) и хорошо аппроксимируются уравнением следующего вида (рис. 2):

$$k_{ВЭУ} = 112,47 \cdot Q_{ВЭУ}^{-0,1434}$$

С учетом сказанного формулу для определения затрат на амортизацию и текущий ремонт можно переписать следующим образом:

$$З_{ВЭУа} = N_{ВЭУам} \cdot (112,47 \cdot Q_{ВЭУ}^{-0,1434}) \cdot Q_{ВЭУ},$$

Прочие расходы обычно принимаются в диапазоне 1-5% от суммы всех остальных эксплуатационных расходов ВЭУ [17]:

$$З_{ВЭУпр} = 0,05 \cdot (З_{ВЭУзп} + З_{ВЭУа}),$$

где 0,05 – коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов, принимаемый в размере 5% затрат на амортизацию, текущий ремонт и оплату труда.

При использовании ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения формулу для определения себестоимости тепловой энергии можно записать следующим образом, руб/Гкал:

$$C_{к+ВЭУ} = (З_{т+ВЭУ} + З_{кзп} + З_{ка} + З_{кпр} + З_{ВЭУзп} + З_{ВЭУа} + З_{ВЭУпр}) / (Q_k \cdot h_k).$$

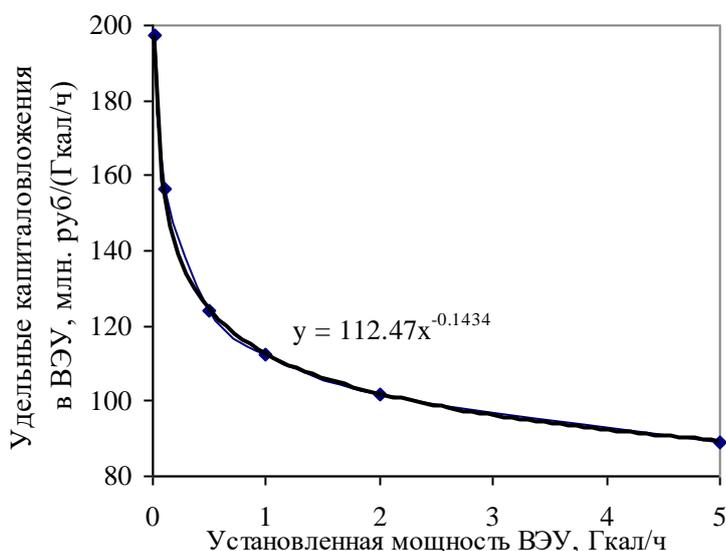


Рис. 2. Зависимость удельных капиталовложений в ВЭУ от их установленной мощности Fig. 2. The dependence of specific investments in WPPs on their installed capacities

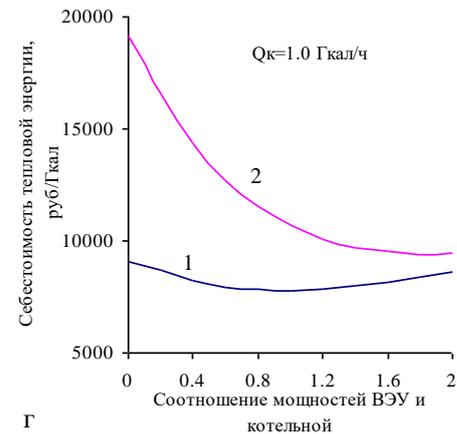
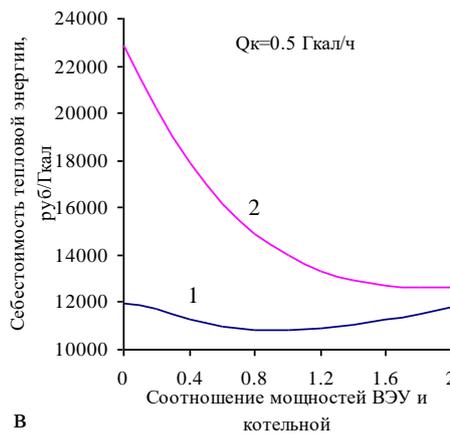
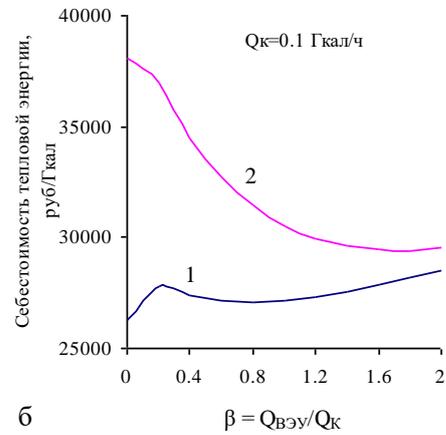
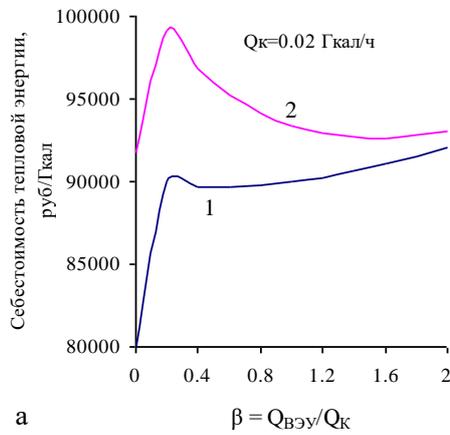
*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты расчетов себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными представлены в виде графиков на рисунке 3. Эти графики позволяют ответить на вопрос, возможно ли (и в каких пределах) снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ВЭУ. Видно, что в зависимости от стоимости топлива, мощности котельной и ее соотношения с мощностью ВЭУ (параметра β) графики имеют разный характер.

Обратимся к рисункам 3а и 3б (кривые 1) из которых видно, что при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. использование ВЭУ совместно с котельными мощностью менее 0,1 Гкал/ч приводит к увеличению себестоимости тепловой энергии, и поэтому этот вариант использования ВЭУ оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной. Это объясняется тем, что у котельных малой мощности топливная составляющая в общей структуре их эксплуатационных расходов незначительна по сравнению с другими затратами и поэтому экономия топлива на котельных за счет использования ВЭУ в данном случае никак не способствует снижению себестоимости тепловой энергии. Данная ситуация сохраняется и при стоимости топлива 72000 руб/т у.т., но только для мелких котельных мощностью около 0,02 Гкал/ч (рис. 3а, кривая 2). По мере увеличения мощности котельных использование ВЭУ уже оказывается эффективным, причем чем больше мощность используемой ВЭУ, тем больший экономический эффект может быть достигнут. Сказанное иллюстрирует рис. 3б (кривая 2), из которого видно, что использование ВЭУ мощностью в 1,2 – 2 раза превышающей мощность котельной ($Q_k = 0,1$ Гкал/ч) позволяет снизить себестоимость тепловой энергии с 38000 до примерно 30000 руб/Гкал.

На рисунках с 3в по 3е изображены графики изменения себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными мощностью более 0,5 Гкал/ч. Для таких котельных использование ВЭУ оказывается эффективным даже при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. По мере увеличения мощности ВЭУ ($\beta > 0$, $Q_K = \text{const}$) экономия топлива на котельной возрастает, в результате чего себестоимость тепловой энергии снижается. При этом, чем больше стоимость топлива, тем интенсивнее происходит снижение себестоимости тепловой энергии. Однако, снижение себестоимости тепловой энергии возможно до определенного минимума, после которого дальнейшее увеличение мощности ВЭУ не целесообразно.

Существует некоторое оптимальное соотношение мощностей ВЭУ и котельной $\beta_{\text{опт}}$, обеспечивающее минимум себестоимости тепловой энергии. Как показали расчеты, при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. и мощности котельной 0,5 Гкал/ч оптимальной является мощность ВЭУ, равная 0,7-1,25 мощности котельной. Для котельных мощностью 1,0, 2,0 и 5,0 Гкал/ч $\beta_{\text{опт}}$ составляет соответственно 0,7-1,3, 0,8-1,35 и 0,9-1,45. При стоимости топлива 72000 руб/т у.т. минимум себестоимости тепловой энергии находится уже в интервале более высоких значений $\beta_{\text{опт}}$ и для котельных мощностью 0,1, 0,5, 1,0, 2,0 и 5,0 Гкал/ч составляет примерно 1,6-2,0. При таких значениях $\beta_{\text{опт}}$ использование ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%.



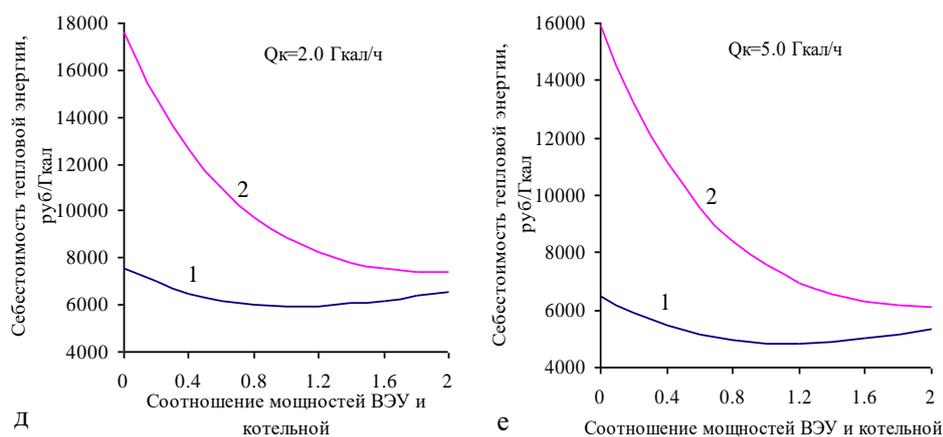


Рис. 3. Графики изменения себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными мощностью от 0.02 до 5.0 Гкал/ч в зависимости от стоимости топлива и параметра β : 1 и 2 – соответственно при стоимости топлива 25000 и 72000 руб/т у.т.

Fig. 3. The graphs of changes in the prime cost of thermal energy when using WPPs in conjunction with boiler houses with capacities from 0.02 to 5.0 Gcal/h, depending on the cost of fuel and parameter β : 1 and 2 – at the fuel cost of 25,000 and 72,000 rubles/tce respectively

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Заключение (Conclusions)

В Мурманской области, как и на всей территории Арктической зоны Российской Федерации, имеется множество удаленных потребителей тепловой энергии, испытывающих различные трудности с организацией теплоснабжения. Основные трудности связаны с тем, что конечная стоимость органического топлива после дополнительных расходов на его доставку удаленным потребителям тепловой энергии может возрастать в несколько раз по сравнению с отпускной ценой у поставщиков. В свою очередь высокая стоимость топлива приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому их дальнейшее существование без государственных субсидий становится не возможным.

В этих условиях в районах с повышенным потенциалом ветра одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии, может быть использование ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения. Исследование показало, что использование ветроэнергетических установок совместно с котельными мощностью более 0,1 Гкал/ч на нужды теплоснабжения позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива стоимостью 25000-72000 руб/т у.т. и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%. Для котельных меньшей мощности эффект от использования ветроэнергетических установок снижается, причем чем меньше мощность котельной, тем больше использование ветроэнергетических установок оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной.

Литература

1. Biev A.A., Serova N.A. Features of the organization of fuel supplies to the Arctic regions of Russia: assessment of transport conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. pp. 012017.
2. Кузнецов Н.М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации: монография. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 92 с.
3. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. 2012. №3(7). С. 22-29.
4. Бежан А.В. Оценка эффективности сооружения ветроэнергетических установок на нужды теплоснабжения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. № 4. С. 366–380.
5. Postnikov I.V. A reliability assessment of the heating from a hybrid energy source based on combined heat and power and wind power plants // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 221. pp. 108372.

6. Bezhan A.V. Heat supply efficiency improvement in the Arctic regions with an increased wind potency // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 976. pp. 012006.
7. Zheng J., Zhou Zh., Zhao J., Wang J. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. pp. 865-874.
8. Minin V.A., Bezhan A.V. Wind energy resources of the Kola peninsula (Russia) // *Dewi Magazin*. 2012. N41. pp. 15-16.
9. Минин В.А., Целищева М.А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования // *Арктика: экология и экономика*. 2023. Т. 13. № 1. С. 72-84.
10. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф, 2008. 584 с.
11. Duan C., Wang Z., Dong S., et al. Wind characteristics and wind energy assessment in the Barents Sea based on ERA-Interim reanalysis // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2018. Vol. 47, N4. pp. 415—428.
12. Минин В.А., Дмитриев Г.С., Минин И.В. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова // *Известия РАН. Энергетика*. 2001. № 1. С. 45-53.
13. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные и отопительные котельные / 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.
14. Барабанер Х.З. Теплоснабжение сельских населенных пунктов. Таллинн: Валгус, 1976. 196 с.
15. Минин В.А., Бежан А.В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей европейского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2009. 56 с.
16. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.
17. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. и др. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / Под редакцией В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 144 с.

Авторы публикации

Бежан Алексей Владимирович - научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН».

Звогарева Юлия Николаевна — канд.техн.наук. доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Пономарев Роман Андреевич – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Biev A.A., Serova N.A. Features of the organization of fuel supplies to the Arctic regions of Russia: assessment of transport conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 539:012017. doi:10.1088/1755-1315/539/1/012017
2. Kuznetsov N.M. *Upravleniye energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: monografiya*. Apatity: Izdatel'stvo FITS KNTS RAN, 2020. (In Russ).
3. Smolentsev D.O. Razvitiye energetiki Arktiki: problemy i vozmozhnosti maloy generatsii. *Arctic: Ecology and Economy*. 2012, 3(7):22-29. (In Russ).
4. Bezhan A.V. Efficiency Estimation of Constructing of Wind Power Plant for the Heat Supply Needs. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2022, 65(4):366–380. doi:10.21122/1029-7448-2022-65-4-366-380
5. Postnikov I.V. A reliability assessment of the heating from a hybrid energy source based on combined heat and power and wind power plants. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022, 221:108372. doi:10.1016/j.res.2022.108372

6. Bezhan A.V. Heat supply efficiency improvement in the Arctic regions with an increased wind potency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 976:012006. doi:10.1088/1757-899x/976/1/012006
7. Zheng J., Zhou Zh., Zhao J., Wang J. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration. *Applied Energy*. 2018, 211:865-874. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.080
8. Minin V.A., Bezhan A.V. Wind energy resources of the Kola peninsula (Russia). *Dewi Magazin*. 2012, 41:15-16.
9. Minin, V. A., Tselishcheva, M. A. Wind resources of the Western sector of the Arctic zone of Russian Federation and possible areas of their use. *Arctic: ecology and economy*. 2023, 1:72—84. (In Russ). doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84
10. Nikolayev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *National Cadastre of Wind energy Resources of Russia and methodological bases for their determination*. Moscow: Atmosgraf, 2008. (In Russ).
11. Duan C., Wang Z., Dong S., et al. Wind characteristics and wind energy assessment in the Barents Sea based on ERA-Interim reanalysis. *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2018, 47(4):415–428. doi:10.1515/ohs-2018-0039
12. Minin V.A., Dmitriev G.S., Minin I.V. Perspektivy osvoyeniya resursov vetrovoy energii Kol'skogo poluoostrova. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2001, 1:45-53. (In Russ).
13. Buznikov E.F., Roddatis K.F., Berzins E.Ya., editors. *Proizvodstvennyye i otopitel'nyye kotel'nyye*. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1984. (In Russ).
14. Barabaner KH.Z. *Teplosnabzheniye sel'skikh naseleennykh punktov*. Tallinn: Valgus, 1976. (In Russ).
15. Minin V.A., Bezhan A.V. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley yevropeyskogo Severa*. Apatity: Izd. Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 2009. (In Russ).
16. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. *Ispol'zovaniye energii vetra v rayonakh Severa*. Leningrad: Nauka, 1989. (In Russ).
17. Burmistrov A.A., Vissarionov V.I., Deryugina G.V., et al. editors. *Metody rascheta resursov vozobnovlyayemykh istochnikov energii: uchebnoye posobiye*. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. (In Russ).

Authors of the publication

Bezhan Alexey Vladimirovich - Researcher, Northern Energetics Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia.

Zvонарева Yulia Nikolaevna - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Рonomarev Roman Andreevich - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 02.05.2023 г.

Отредактировано 29.05.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.