

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-285-296>

УДК 697.34+621.548

Повышение эффективности систем теплоснабжения за счет внедрения ветроэнергетических установок

А. В. Бежан¹⁾

¹⁾Центр физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (Апатиты, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Современный рост потребления энергии, который напрямую связан с использованием большого количества ископаемых видов топлива и, как следствие, вызывающий загрязнение окружающей среды, требует поиска путей, направленных на энергосбережение и экономное расходование традиционных энергетических ресурсов, а также сохранение экологического благополучия. В такой ситуации хорошим решением данной проблемы может быть применение технологий производства энергии, основанных на использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и, в частности, энергии ветра. В системах теплоснабжения ветровая энергия может вовлекаться в технологии производства теплоты и далее расходоваться на нужды отопления городов и поселков. Рассмотрен способ теплоснабжения зданий за счет применения комбинированной системы источников энергии, состоящей из котельной и ветроэнергетических установок. Разработаны методические основы алгоритма работы такой системы, теплоснабжение от которой базируется на том, что котельная включается в работу, дополняя ветроустановки, только при условии слабого ветра или его отсутствии. В остальных случаях теплоснабжение осуществляется за счет работы ветроустановок, а котельная находится в ожидании отопительной нагрузки. Приведена оценка возможного применения ветроэнергетических установок совместно с котельной в обеспечении графика отопительной нагрузки потребителей, расположенных в районе с повышенным потенциалом ветра, среднегодовая скорость которого составляет ~7 м/с. Продолжительность отопительного сезона в этом районе 9–10 месяцев в году. Установлено, что совместное использование котельной и ветроэнергетических установок для целей теплоснабжения в течение года может обеспечить снижение доли участия котельной в теплоснабжении потребителей на 50–70 % и более.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, теплоснабжение, ветроэнергетическая установка, котельная, энергосбережение, энергоэффективность, ископаемое органическое топливо

Для цитирования: Бежан, А. В. Повышение эффективности систем теплоснабжения за счет внедрения ветроэнергетических установок / А. В. Бежан // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 285–296. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-285-296>

Адрес для переписки

Бежан Алексей Владимирович
Центр физико-технических проблем энергетики
Севера Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр
Российской академии наук»
ул. Ферсмана, 14,
184209, г. Апатиты, Российская Федерация
Тел.: 8 815 557-93-69
abezh@rambler.ru

Address for correspondence

Bezhan Alexey V.
Northern Power Engineering Research
Centre – Branch of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences”
14, Fersmana str.,
184209, Apatity, Russian Federation
Tel.: 8 815 557-93-69
abezh@rambler.ru

Performance Improvement of Heat Supply Systems Through the Implementation of Wind Power Plants

A. V. Bezhan¹⁾

¹⁾Northern Power Engineering Research Centre – Branch of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” (Apatity, Russian Federation)

Abstract. The current growth of energy consumption, which is directly related to the use of a large number of fossil fuels, and, as a result, causes environmental pollution, requires the search for ways to conserve energy and use traditional energy resources economically, as well as to preserve environmental well-being. In such a situation, a good solution to this problem can be the use of energy production technologies based on the use of non-traditional and renewable energy sources, and, in particular, the use of wind energy. In heat supply systems, wind energy can be involved in heat production technologies and then used for heating cities and towns. The method of heat supply of buildings through the use of a combined system of energy sources, consisting of a boiler house and wind power plants, is considered. The methodical basis of a very specific heat supplying system has been developed. The specificity of this system is that the boiler comes into operation, complementing the wind turbine operation, only if the wind is weak or absent at all. In other cases, the heat supply is provided by wind turbines, and the boiler house is waiting for the heating load. An assessment of the possible use of wind power facilities together with a boiler house in providing a heating load schedule for consumers located in an area with an increased potential of the wind which average annual speed is at the level of ~7 m/s is presented. The duration of the heating season in this area is 9–10 months a year. It is shown that the joint use of the boiler house and wind power plants for heat supply purposes during the year can reduce the share of the boiler house in the heat supply of consumers by 50–70 % or more.

Keywords: renewable energy sources, heat supply, wind power plant, boiler house, energy saving, energy efficiency, fossil fuel

For citation: Bezhan A. V. (2020) Performance Improvement of Heat Supply Systems Through the Implementation of Wind Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 285–296. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-285-296> (in Russian)

Введение

В современном мире существование человечества и успешное развитие большинства территорий его проживания напрямую связаны с высоким уровнем потребления энергии, которое удваивается каждые 12 лет [1, 2]. Производство значительной части энергии, как правило, основано на добыче и последующем сжигании углеводородных видов топлива (угля, нефти, природного газа), запасы которых ограничены и имеют неравномерное распределение по территории Земли [3]. На рис. 1 представлена структура мирового потребления первичных источников энергии [4]. Из рисунка видно, что потребление ископаемых видов топлива преобладает над использованием других типов энергетических ресурсов. В свою очередь, потребление большого количества таких энергоносителей отрицательно сказывается на экологическом состоянии всей природной среды.

В настоящее время многие ученые и исследователи со всего мира ведут разработки и занимаются поиском путей, которые способствовали бы сбе-

режению и экономному расходованию традиционных энергетических ресурсов, а также сохранению экологического благополучия окружающей среды [5–8]. Одним из направлений решения данной проблемы может быть применение технологий производства энергии, основанных на использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ), в частности энергии ветра [9–11]. В этом случае за счет применения ветроэнергетических установок (ВЭУ) кинетическая энергия движения воздушных масс преобразуется в электрическую. В тепловых системах коммунального назначения энергия, получаемая от ВЭУ, может быть вовлечена в технологии производства теплоты и далее расходоваться на нужды теплоснабжения городов и поселков [12, 13].

Сегодня теплоснабжение с использованием НВИЭ основано на применении энергетических установок, использующих чаще всего глубинную теплоту Земли, энергию солнца, биотопливо и другие источники. В качестве таких энергоустановок применяются тепловые насосы, солнечные панели, биоустановки и др. [14, 15]. Использование энергии ветра для отопления потребителей пока не нашло широкого применения и в большинстве случаев носит исследовательский характер [16, 17].

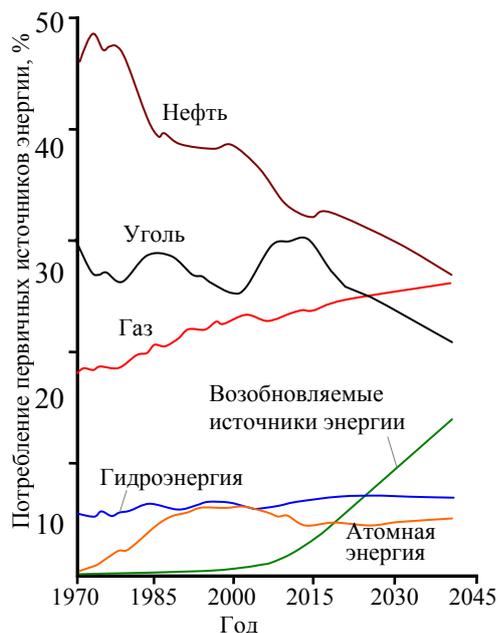


Рис. 1. Структура потребления основных энергетических ресурсов в мире

Fig. 1. The consumption structure of basic energy resources in the world

Рассмотрим способ теплоснабжения зданий за счет применения комбинированной системы источников энергии, состоящей из котельной и ветроэнергетических установок. Для этого созданы методические основы алгоритма работы такой системы, использование которого в дальнейшем может быть полезно при проектировании и математическом моделировании комбинированных систем теплоснабжения с применением ВЭУ. Предлагается способ сохранения и использования избытков энергии, вырабатываемой ВЭУ,

за счет теплоаккумулирующей способности зданий путем изменения температуры внутреннего воздуха в интервале 18–25 °С.

Постановка задачи

Работа современных теплоснабжающих систем напрямую связана с использованием топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), что ставит определенные энергетические, экономические и экологические задачи, решение которых возможно только с применением энергосберегающих и энергоэффективных технологий. В такой ситуации использование энергии ветра в технологиях производства теплоты для целей теплоснабжения способствует повышению энергетической эффективности работы традиционных теплоэнергетических объектов и, как следствие, экономному расходованию ТЭР, а также снижению вредных выбросов в окружающую среду. Поэтому очень важной является задача определения возможностей включения ВЭУ в системы теплоснабжения потребителей и эффекта, который может быть получен от таких мероприятий.

Методика исследования

Традиционно теплоснабжение потребителей реализуется от энергетических объектов (ТЭЦ, котельных и др.), работающих на органическом топливе. Если единственным источником тепловой энергии является котельная, то в общем виде схема теплоснабжения может выглядеть так, как показано на рис. 2. В этом случае теплота Q_k , поступающая от котельной для целей теплоснабжения, расходуется на восполнение тепловых потерь Q_o отапливаемых зданий и сооружений. Математически это можно записать следующим образом:

$$Q_o = Q_k. \quad (1)$$

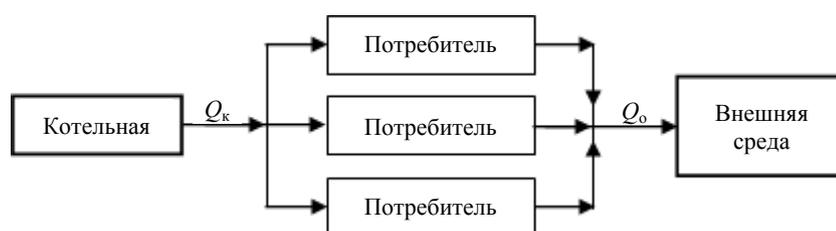


Рис. 2. Структурная схема системы теплоснабжения, реализуемого от котельной

Fig. 2. The block diagram of heating supplying system based on the boiler house

Равенство (1) характеризует процесс, при котором график отопительной нагрузки полностью покрывается от котельной.

Введем параметр γ , обозначающий долю участия котельной в теплоснабжении потребителей. В рассматриваемом случае $\gamma = 1$.

В системах теплоснабжения совместно с котельной в качестве дополнительного источника тепловой энергии имеется возможность применения ветроэнергетических установок (рис. 3). В этом случае теплота, необходимая для поддержания требуемого теплового баланса отапливаемых зданий и сооружений, подается одновременно от ветроустановок и котельной, а значит, необходимость в применении котельной для теплоснабжения уменьшается ($\gamma < 1$).

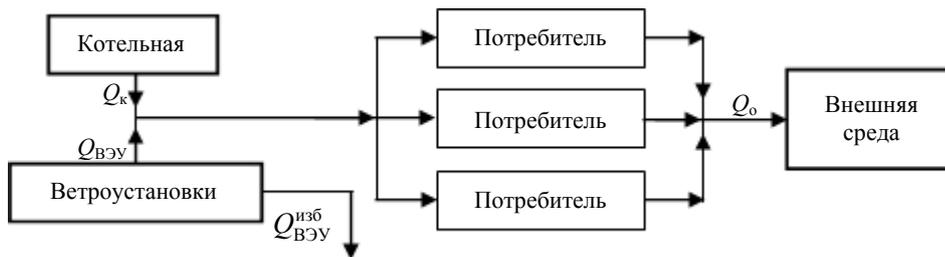


Рис. 3. Комбинированная система теплоснабжения на основе котельной и ветроэнергетических установок

Fig. 3. The general view of the combined heat supply system based on the boiler house and wind turbines

Рассмотрим более подробно совместную работу таких источников тепловой энергии. Как видно из рис. 4, на котором показан месячный график отопительной нагрузки, обеспечиваемый работой ВЭУ (область зеленого цвета) и котельной (область красного цвета), возможны три варианта развития событий.

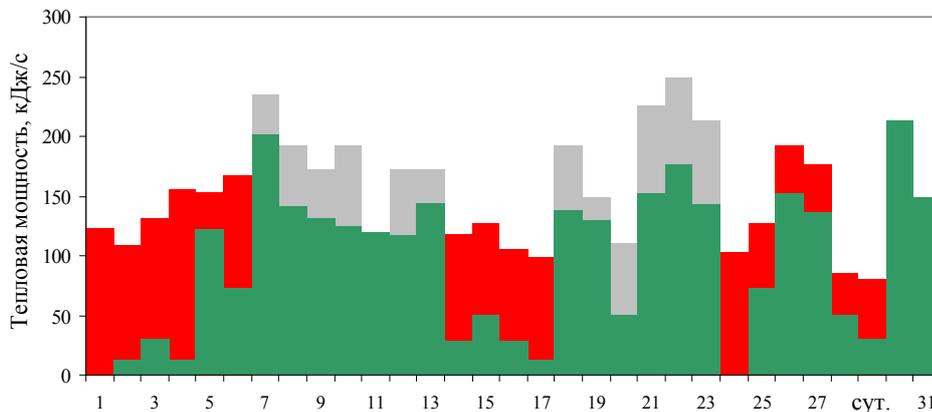


Рис. 4. Месячный график отопительной нагрузки: зеленый и красный цвета – соответственно участие ветроэнергетических установок и котельной в покрытии отопительной нагрузки; серый цвет – избыточная мощность, выдаваемая ветроэнергетическими установками

Fig. 4. The monthly heating load schedule: green and red colors – participation of wind power plants and the boiler room in the heating load provision, respectively; gray color – represents the surplus power delivered by the wind turbine

Вариант 1. В моменты времени, когда ветроустановки способны в полном объеме обеспечить потребителей тепловой энергией или даже создать ее избыток, участие котельной в теплоснабжении не требуется ($\gamma = 1$). В этом случае выполняется условие

$$Q_{\text{ВЭУ}} \geq Q_0,$$

где $Q_{\text{ВЭУ}}$ – мощность, выдаваемая ветроустановками, кДж/с.

Если тепловой энергии, поступающей от ВЭУ, полностью хватает для восполнения тепловых потерь отапливаемых зданий и сооружений, то уравнение (1) для системы теплоснабжения, изображенной на рис. 3, можно переписать в следующем виде:

$$Q_0 = Q_{\text{ВЭУ}}. \quad (2)$$

На рис. 4 это соответствует 11, 30 и 31 сут. рассматриваемого месяца.

В периоды времени, когда имеется сильный ветер, могут возникать избытки энергии $Q_{\text{ВЭУ}}^{\text{изб}}$, вырабатываемой ветроустановками. На рис. 4 такие периоды соответствуют следующим временным интервалам: 7–10, 12–13 и 18–23 сут.

Формулу (2) в этом случае можно представить как

$$Q_0 = Q_{\text{ВЭУ}} - Q_{\text{ВЭУ}}^{\text{изб}}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) описывают процесс, при котором график отопительной нагрузки полностью покрывается от ВЭУ (рис. 4, 7–13, 18–23 и 30–31 сут.).

Вариант 2 характеризует отопительный процесс, когда мощности ВЭУ недостаточно для обеспечения потребителей тепловой энергией, т. е. выполняется условие

$$0 < Q_{\text{ВЭУ}} < Q_0.$$

В этом случае в работу дополнительно вступает котельная, причем доля ее участия в теплоснабжении находится в интервале от 0 до 1 ($0 < \gamma < 1$) и математически может быть определена из выражения

$$\gamma = 1 - \frac{Q_{\text{ВЭУ}}}{Q_0}.$$

Тогда в (1) можно добавить слагаемое $Q_{\text{ВЭУ}}$

$$Q_0 = Q_{\text{к}} + Q_{\text{ВЭУ}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{к}} = \gamma Q_0$ – мощность, выдаваемая котельной и характеризующая ее вклад в теплоснабжение потребителей, кДж/с.

Такой вариант совместной работы котельной и ВЭУ для нужд теплоснабжения представлен на рис. 4: 2–6, 14–17 и 25–29 сут., где области зеленого и красного цветов соответствуют вкладу ВЭУ и котельной в обеспечение графика отопительной нагрузки.

Вариант 3 соответствует периодам отсутствия ветра, когда ВЭУ находится в состоянии покоя, т. е. $Q_{ВЭУ} = 0$. В этом случае теплоснабжение полностью осуществляется от одной котельной ($\gamma = 1$) согласно (1) (рис. 4, 1 и 24 сут.).

Для повышения эффективности работы комбинированной системы теплоснабжения на основе котельной и ВЭУ применяют аккумуляторы тепловой энергии, позволяющие сохранять и в дальнейшем полезно использовать избытки энергии, вырабатываемой ВЭУ. В этом случае любые отапливаемые здания могут быть рассмотрены как аккумуляторы тепловой энергии. В таких зданиях, как правило, кроме воздуха имеются стены, крыши и другие различные материалы, которые могут сохранять некоторое количество тепловой энергии, а потом отдавать ее во внешнюю среду.

Для жилых зданий минимальная температура внутреннего воздуха, которая должна поддерживаться в течение всего отопительного сезона, установлена на уровне 18 °С (рис. 5, линия 1). Запас избытков энергии от ВЭУ можно осуществить путем нагревания здания до температуры 18–25 °С (рис. 5, кривая 2). В моменты времени, когда мощности ВЭУ недостаточно для обеспечения потребителей тепловой энергией, запасенная теплота в объеме здания позволит котельной еще некоторое время не включаться в работу. При этом температура внутреннего воздуха здания будет снижаться с 25 до 18 °С (рис. 5, кривая 3). При достижении температуры внутреннего воздуха 18 °С в работу дополнительно вступает котельная, обеспечивающая недостающую часть графика отопительной нагрузки.

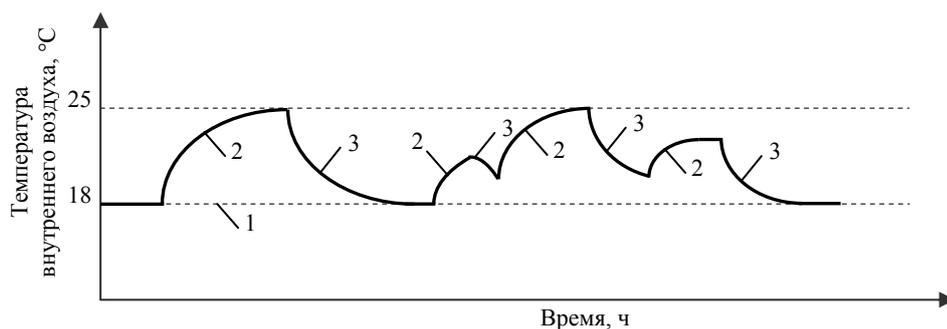


Рис. 5. Изменение температуры внутреннего воздуха жилого здания:
1 – рекомендуемая температура 18 °С; 2, 3 – период нагревания
и охлаждения здания соответственно

Fig. 5. Alteration of indoor air temperature of a residential building:
1 – recommended temperature is 18 °С;
2, 3 – heating and cooling periods of a residential building, respectively

Результаты исследований

На примере населенного пункта Вайда-Губа (Мурманская обл., Россия) рассмотрим практический вариант возможной эксплуатации ВЭУ совместно с котельной для целей отопления. Вайда-Губа расположена в северо-западной части России на побережье Баренцева моря в зоне ветра со среднегодовой скоростью 6,6 м/с.

Теплоснабжение поселка осуществляется от котельной, суммарная подключенная нагрузка которой составляет 398 кДж/с, в том числе 307 кДж/с – на цели теплоснабжения и 91 кДж/с – на горячее водоснабжение. В качестве дополнительного источника энергии, работающего на нужды теплоснабжения, выбрана ветроэнергетическая установка мощностью 250 кДж/с (80 % от подключенной нагрузки на отопление).

При выполнении расчетов было принято, что потери тепловой энергии в тепловой сети и в системах отопления зданий, а также потери электрической энергии при ее передаче от ВЭУ учитываться не будут.

В ходе проведенного исследования рассмотрены два варианта теплоснабжения – без и с эксплуатацией ВЭУ.

На рис. 6а представлен график теплоснабжения только от котельной в соответствии с отопительной нагрузкой (рис. 6а). Наибольшая потребность в тепловой энергии возникает в зимнее время, когда температура наружного воздуха минимальна, а интенсивность ветра соответствует максимальным значениям. В весенние и осенние месяцы потребность в отоплении снижается. Летом котельная находится в нерабочем состоянии.

Возможное включение ВЭУ в обеспечение графика отопительной нагрузки продемонстрировано на рис. 6б, из которого видно, что в промежутки времени с сильным ветром ВЭУ готова полностью (иногда частично) обеспечить потребителей теплотой (рис. 6б, область зеленого цвета). Когда мощности, выдаваемой от ВЭУ, не хватает, в работу вступает котельная и дополняет ВЭУ (рис. 6б, область красного цвета). Если потребность в теплоте со стороны потребителей будет меньше, чем мощность, получаемая от ВЭУ, то могут наблюдаться избытки энергии (рис. 6б, область серого цвета). Именно за счет использования теплоаккумулирующей способности здания такие избытки можно сохранить и в дальнейшем использовать. При этом график отопительной нагрузки, представленный на рис. 6б, претерпевает изменения согласно рис. 6с.

Результаты расчетов позволили установить, что энергетическая эффективность, которая может быть получена в течение года от эксплуатации ВЭУ для целей теплоснабжения, выразилась в уменьшении доли участия котельной в отоплении потребителей примерно на 60 % (рис. 7) и, как следствие, в снижении расхода органического топлива. В свою очередь, использование избытков энергии ВЭУ за счет теплоаккумулирующей способности зданий позволяет дополнительно повысить эффективность применения ВЭУ для целей теплоснабжения на 3–9 % путем изменения темпе-

ратуры внутреннего воздуха в интервале 18–25 °С. Соответственно на столько же уменьшилась доля участия котельной в отоплении потребителей (рис. 7).

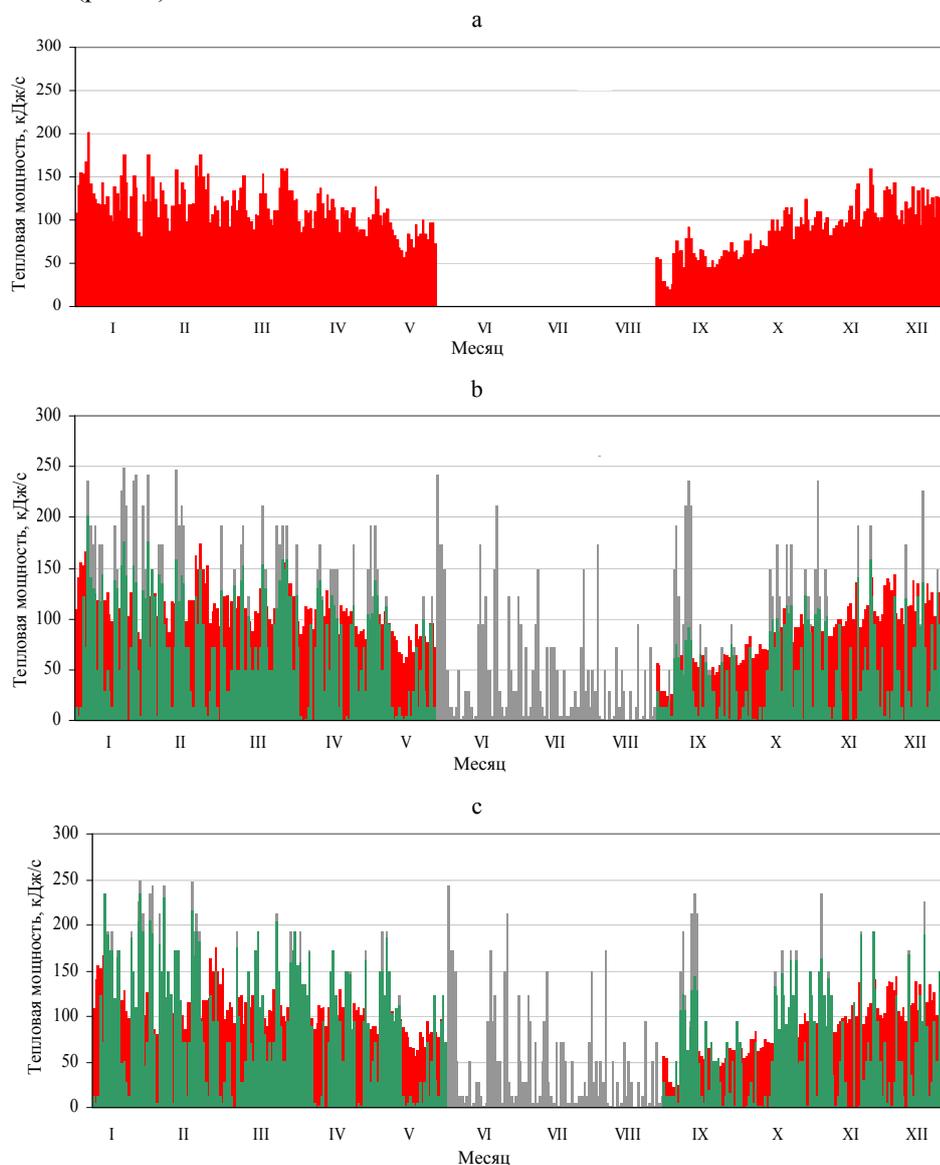


Рис. 6. Годовой график отопительной нагрузки населенного пункта Вайда-Губа при теплоснабжении: а – только от котельной (красный цвет); б – от котельной и ветроэнергетических установок (красный и зеленый цвета соответственно), избыточная мощность – серый цвет; в – за счет использования теплоаккумулирующей способности здания

Fig. 6. Heating load annual schedule of the inhabited locality of Vayda-Guba, for heat supply: а – only from the boiler room (red); б – from the boiler room and wind power plants (red and green, accordingly), the surplus power is represented by grey; в – by using the heat storage capacity of the building

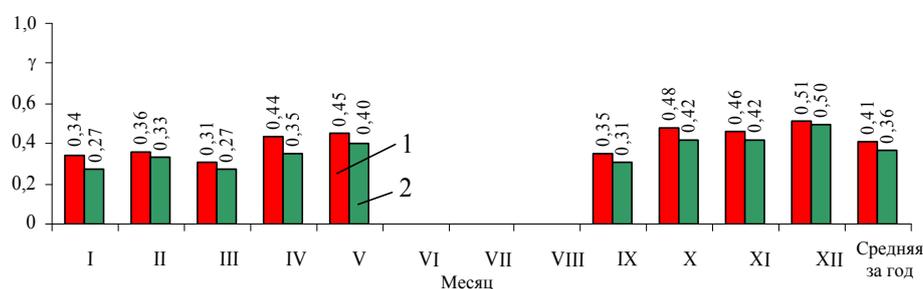


Рис. 7. Доля участия котельной в отоплении потребителей при неиспользовании (1) и использовании (2) избытков энергии ветроустановок

Fig. 7. The boiler room contribution to the heat supply for consumers when not using (1) and using (2) WPP energy surplus

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен способ теплоснабжения зданий за счет применения котельной и ветроэнергетических установок. Основной эффект от применения ветроустановок выражается в экономии органического топлива, использование которого в отдельных случаях связано с большими трудностями, а также с антропогенным загрязнением природной среды.

2. Разработаны методические основы алгоритма работы ветроустановок совместно с котельной для целей теплоснабжения. В основу теплоснабжения от такой комбинированной системы источников энергии положено, что котельная включается в работу, дополняя ветроустановки, только при условии слабого ветра или его отсутствии. В остальных случаях теплоснабжение осуществляется за счет работы ветроустановок, а котельная находится в ожидании отопительной нагрузки.

3. Установлено, что в районах со среднегодовой скоростью ветра около 7 м/с применение ветроустановок для целей теплоснабжения позволяет в отдельные месяцы уменьшить участие котельной в обеспечении отопительной нагрузки на 50–70 %, а следовательно, снизить расход органического топлива, используемого на котельной.

4. Показано, что применение теплоаккумулирующей способности зданий позволяет сохранять и в дальнейшем полезно использовать избытки энергии ветроустановок. При этом дополнительно повышается энергетическая эффективность от эксплуатации ветроустановок, которая выражается в уменьшении доли участия котельной в отоплении потребителей на 3–9 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amasyali, K. A Review of Data-Driven Building Energy Consumption Prediction Studies / K. Amasyali, N. M. El-Gohary // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1192–1205. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.095.
2. A Review on Applications of ANN and SVM for Building Electrical Energy Consumption Forecasting / A. S. Ahmad [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 33. P. 102–109. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.069.

3. Awad, A. H. Hydrogen Versus Synthetic Fossil Fuels / A. H. Awad, T. Vezirgolu // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1984. Vol. 9, No 5. P. 355–366.
4. British Petroleum // BP Energy Outlook, 2018 ed. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>. Date of access: 20.06.2018.
5. Co-Gasification and Recent Developments on Waste-to-Energy Conversion: a Review / A. Ramos [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 380–398.
6. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.
7. Dyreson, A. Night Sky Cooling for Concentrating Solar Power Plants / A. Dyreson, F. Miller // *Applied Energy*. 2016. Vol. 180. P. 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.118>.
8. Wu, D. W. Combined Cooling, Heating and Power: a Review / D. W. Wu, R. Z. Wang // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32, No 5–6. P. 459–495.
9. Chang, W. R. Environmental Impact and Sustainability Study on Biofuels for Transportation Applications / W. R. Chang, J. J. Hwang, W. Wu // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. P. 277–288.
10. Increasing the Flexibility of Combined Heat and Power for Wind Power Integration in China: Modeling and Implications / X. Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015. Vol. 30. P. 1848–1857.
11. Sakipova, S. Sail-Type Wind Turbine for Autonomous Power Supply: Possible Use in Latvia / S. Sakipova, A. Jakovics // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2014. Vol. 51. P. 13–25.
12. Bezhan, A. V. Mathematical Description of a Boiler House Operating Jointly with a Wind Power Plant and Heat Storage / A. V. Bezhan, V. A. Minin // *Thermal Engineering*. 2011. Vol. 58, No 11. P. 903–909. doi: 10.1134/S0040601511110024.
13. Integrated Heat and Power Dispatch Truly Utilizing Thermal Inertia of District Heating Network for Wind Power Integration / J. Zheng [et al.] // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 865–874. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.080.
14. Оценка энергетической эффективности цикла теплового насоса со ступенчатым сжатием / С. К. Абильдинова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, No 3. С. 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302>.
15. Abdelkrim, K. Approach for the Modelling of Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector / K. Abdelkrim, T. Khaled, B. Hocine // *IET Renewable Power Generation*. 2015. Vol. 9. P. 207–217. doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0076.
16. Автономные ветровые энергоустановки с аккумуляторами тепла / О. С. Попель [и др.] // *Альтернативная энергетика и экология*. 2008. № 11. С. 78–84.
17. Марченко, О. В. Экономическая эффективность ветроэнергетических установок в системах электро- и теплоснабжения / О. В. Марченко, С. В. Соломин. Иркутск: СЭИ, 1996. 28 с.

Поступила 20.02.2019 Подписана в печать 29.04.2019 Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Amasyali K., El-Gohary N. M. (2018) A Review of Data-Driven Building Energy Consumption Prediction Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1192–1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>.
2. Ahmad A. S., Hassan M. Y., Abdullah M. P., Rahman H. A., Hussin F., Abdullah H., Saidur R. (2014) A Review on Applications of ANN and SVM for Building Electrical Energy Consumption Forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.069>.

3. Awad A. H., Vezirgolu T. (1984) Hydrogen Versus Synthetic Fossil Fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9 (5), 355–366. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(84\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0360-3199(84)90055-7).
4. British Petroleum. *BP Energy Outlook 2018 ed.* Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>. (Accessed 20 Juni 2018).
5. Ramos A., Rouboa A., Monteiro E., Silva V. (2018) Co-Gasification and Recent Developments on Waste-to-Energy Conversion: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>.
6. Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. (2020) Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41> (in Russian).
7. Dyreson A., Miller F. (2016) Night Sky Cooling for Concentrating Solar Power Plants. *Applied Energy*, 180, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.118>.
8. Wu D. W., Wang R. Z. (2006) Combined Cooling, Heating and Power: A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32 (5–6), 459–495. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001>.
9. Chang W. R., Hwang J. J., Wu W. (2017) Environmental Impact and Sustainability Study on Biofuels For Transportation Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.020>.
10. Chen X., Kang C., O'Malley M., Xia Q. (2015) Increasing the Flexibility of Combined Heat and Power for Wind Power Integration in China: Modeling and Implications. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30, 1848–1857. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2356723>.
11. Sakipova S., Jakovics A. (2014) Sail-Type Wind Turbine for Autonomous Power Supply: Possible Use in Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 51, 13–25 <https://doi.org/10.1515/lpts-2014-0033>.
12. Bezhan A. V., Minin V. A. (2011) Mathematical Description of a Boiler House Operating Jointly with a Wind Power Plant and Heat Storage. *Thermal Engineering*, 58 (11), 903–909. <https://doi.org/10.1134/S0040601511110024>.
13. Zheng J., Zhou Zh., Zhao J., Wang J. (2018) Integrated Heat and Power Dispatch Truly Utilizing Thermal Inertia of District Heating Network for Wind Power Integration. *Applied Energy*, 211, 865–874. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.080>.
14. Abildinova S. K., Musabekov R. A., Rasmukhametova A. S., Chicherin S. V. (2019) Evaluation of the Energy Efficiency of the Stage Compression Heat Pump Cycle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302> (in Russian).
15. Abdelkrim K., Khaled T., Hocine B. (2015) Approach for the Modelling of Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector. *IET Renewable Power Generation*, 9, 207–217. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0076>.
16. Popel' O. S., Frid S. E., Efimov D. V., Anisimov A. M. (2008) Autonomous Windpower Systems with Heat Storage Devices. *Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya = Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, (11), 78–84 (in Russian).
17. Marchenko O. V., Solomin S. V. (1996) *Economic Efficiency of Wind Power Plants in Electrical and Heat Supply Systems*. Irkutsk, Syberian Energy Institute. 28 (in Russian).

Received: 20 February 2019

Accepted: 29 April 2019

Published online: 29 May 2020