

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика

Научная статья

УДК 330.15

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.12>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Денис Васильевич Петров^{1*}, Роман Евгеньевич Бережной²,
Владимир Владимирович Сакунов³

^{1, 2, 3} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ Petrov-danc@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2408-551X>

² berezhnoy-roman00@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8469-6684>

³ www.sakunov12@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Повышение эффективности систем отопления жилых домов является одной из приоритетных задач теплоэнергетики. Одним из способов повысить энергоэффективность отопления является использование тепловых насосов (ТН). **Цель.** Обоснование способа повышения эффективности тепловых насосов. **Материалы и методы.** Исследование опирается на эмпирические методы прямого и опосредованного наблюдений, аналитический и экспериментальный методы. **Результаты и обсуждение.** Эффективность теплового насоса определяется коэффициентом тепловой трансформации, который тем выше, чем выше температура источника низкопотенциального тепла (НТП). В данной работе показана возможность эффективного использования в качестве НТП теплоты органических отходов (биомассы), температура брожения которой может достигать достаточно высоких значений. Проведенные эксперименты и теоретические расчеты показывают значительное увеличение эффективности ТН при повышении температуры НТП. **Заключение.** При использовании биомассы в качестве НТП коэффициент преобразования теплового насоса достигает 5...7 единиц, что позволяет его использовать в качестве альтернативы газовому отоплению. Проведенные эксперименты подтверждают теоретические расчеты коэффициента преобразования, и можно говорить об экономической эффективности применения таких теплонасосных установок.

Ключевые слова: тепловой насос, коэффициент теплового преобразования, биомасса, энергоэффективность, энергосбережение

Для цитирования: Петров Д. В., Бережной Р. Е., Сакунов В. В. Использование биомассы для повышения эффективности теплонасосных установок // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1 (100). С. 124–129. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.12>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023;

одобрена после рецензирования 28.12.2023;

принята к публикации 11.01.2024.

Research article

USING BIOMASS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF HEAT PUMP INSTALLATIONS

Denis V. Petrov^{1*}, Roman E. Berezhnoy², Vladimir V. Sakunov³

^{1, 2, 3} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ Petrov-danc@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2408-551X>

² berezhnoy-roman00@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8469-6684>

³ www.sakunov12@yandex.ru

* Corresponding author

Abstract. Introduction. Increasing the efficiency of residential heating systems is one of the priority tasks of the thermal power industry. One way to increase the energy efficiency of heating is to use heat pumps (HP). **Goal.** Justification of a method for increasing the efficiency of heat pumps. **Materials and methods.** The research is based on empirical methods of direct and indirect observations, analytical and experimental methods. **Results and discussion.** The efficiency of a heat pump is determined by the thermal transformation coefficient, which is higher the higher the temperature of the low potential heat source (LPH). This work shows the possibility of effectively using the heat of organic waste (biomass) as an LPH, the fermentation temperature of which can reach quite high values. Conducted experiments and theoretical calculations show a significant increase in the efficiency of HP with increasing temperature of the LPH. **Conclusion.** When using biomass as LPH, the conversion coefficient of the heat pump reaches 5...7 units, which allows it to be used as an alternative to gas heating. The experiments carried out confirm the theoretical calculations of the conversion coefficient, and we can talk about the economic efficiency of using such heat pump units.

Keywords: heat pump, thermal conversion coefficient, biomass, energy efficiency, energy saving

For citation: Petrov DV, Berezhnoy RE, Sakunov VV. Using biomass to increase the efficiency of heat pump installations. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2024;1(100):124-129. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.12>

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

The article was submitted 12.12.2023;

approved after reviewing 28.12.2023;

accepted for publication 11.01.2024.

© Петров Д. В., Бережной Р. Е., Сакунов В. В., 2024

Введение / Introduction. Энергосбережение является одной из наиболее актуальных проблем современности. Решение её лежит в основе развития энергетики, экономики, экологической защиты.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов представляет сегодня собой одну из глобальных мировых проблем, успешное решение которой будет иметь определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды его обитания. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергосберегающих технологий, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ).

Одним из крупнейших потребителей энергии в нашей стране являются системы теплоснабжения. Преимущества технологий теплоснабжения, использующих нетрадиционные источники энергии в сравнении с их традиционными аналогами связаны не только со значительными сокращениями затрат энергии в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений, но и с их экологической чистотой, а также новыми возможностями в области повышения автономности систем жизнеобеспечения.

На текущий момент многие исследователи обратили свое внимание на энергетический потенциал биомассы. Правда, в основном с точки зрения либо ее сжигания, что сопряжено с большой экологической нагрузкой, либо с позиции ее переработки в биотопливо, в том числе в биогаз. Однако в конечном счете как первое, так и второе заканчивается процессом сжигания топлива с последующими выбросами вредных соединений в атмосферу. Кроме того, такие установки дороги в обслуживании и довольно опасны в эксплуатации.

Весьма эффективным направлением внедрения рассматриваемых технологий в практику является применение теплонасосных систем теплоснабжения (ТТС) [1, 2]. Основной принцип теплового насоса основан на обратном цикле Карно («холодильник наоборот») и заключается в аккумулировании низкотемпературного тепла при испарении и дальнейшей отдаче энергии при последующей конденсации. Этот процесс происходит с повышением температуры, если рабочее тело (хладагент) будет сжато механически, т. е. пройдет через компрессор.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. В работе проведен эксперимент с обратимой холодильной установкой (сплит-система MSS-09R01) и непосредственным контролем и наблюдением температуры испарителя и радиатора при помощи цифрового термометра на базе мультиметра DT-838. По результатам которого, опосредованно, были получены практические значения коэффициентов теплового преобразования. Для расчета теоретических значений коэффициентов теплового преобразования был применен аналитический метод с использованием уравнения Мартыновского.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Эффективность теплового насоса оценивается так называемым коэффициентом трансформации, или коэффициентом теплового преобразования – отношением затраченной энергии на привод компрессора установки к энергии, полученной на выходе [1, 2].

$$COP = W/Q, \quad (1)$$

где COP (coefficient of performance) – идеальный коэффициент преобразования теплового насоса; W – энергия, подводимая к компрессору; Q – тепловая энергия, полученная на выходе теплового насоса.

Существуют различные способы увеличения данного коэффициента теплового преобразования, в т. ч. снижение температуры на выходе из компрессора и повышение температуры в среде, куда помещен испаритель теплонасосной установки, т. е. источника низкопотенциального тепла.

Идеальный коэффициент теплового преобразования ТНУ можно вычислить по известной формуле Карно [1, 2]:

$$COP = \frac{T_{кон}}{(T_{кон} - T_0)} \quad (2)$$

где $T_{кон}$ – температура конденсации агента; T_0 – температура испарителя (температура среды из которой отбирается тепло).

Естественно, что за счет механических и термодинамических потерь действительный коэффициент теплового преобразования будет значительно ниже. В середине XX века советский ученый В. С. Мартыновский предложил свою полуэмпирическую формулу для вычисления действительного коэффициента теплового преобразования, которая успешно применяется на сегодняшний день.

Действительный коэффициент теплового преобразования по зависимости В. С. Мартыновского [2]:

$$\mu = 0,9 + \frac{0,74 \times T_0}{(T_{\text{кон}} - T_0)} - \left(0,0032 \times T_0 + \frac{0,765 \times T_0}{T_{\text{кон}}} \right), \quad (3)$$

где T_0 – температура испарения агента (температура среды), К; $T_{\text{кон}}$ – температура конденсации агента (для R142 – 333...343 К).

При этом остро встает вопрос обнаружения низкопотенциального источника энергии. Как известно тепловой насос может успешно функционировать при температуре источника низкопотенциального тепла (НПТ) не ниже 2 °С, что затрудняет его использование в умеренном климате в зимний период [3]. Кроме того, чем выше температура низкопотенциального источника тепла, тем выше эффективность теплонасосных установок, и в ряде случаев она способна превзойти эффективность классического газового отопления [4, 5].

В качестве энергетических доноров (окружающей среды испарителя или низкопотенциальных источников тепловой энергии) могут выступать вода, грунт, утилизируемая теплота систем вентиляции и т. д. Температура воды близлежащих водоемов и грунта в зимний период не превышает 4–6 °С, а улавливание теплоты систем вентиляции технически затруднительно. Коэффициент теплового преобразования таких ТН не превышает 5 [2, 3] (для грунта и воды – 4). При действующих тарифах на электроэнергию затраты на привод компрессора такого ТН не окупятся полученным энергетическим эффектом при сравнении с классическим газовым отоплением.

В нашей работе предлагается в качестве источника низкопотенциальной теплоты использовать энергию перегнивания естественных отходов сельскохозяйственного производства (биомассы), температура брожения которых даже в холодный период может достигать 60 °С, что позволит увеличить коэффициент теплового преобразования теплового насоса до 7 и выше, при условии использования системы обогреваемых полов, когда температура воды в системе отопления может находиться в пределах 50–60 °С. Понятно, что такой подход к повышению эффективности тепловых насосов актуален для сельской местности или небольших городских округов.

Расчеты по формуле (3) показали, что при температуре испарения агента 40 °С и температуре конденсации 70 °С коэффициент теплового преобразования может составить 7 единиц. Если же снизить температуру конденсации до 60 °С, то можно добиться значений $\mu = 9$ и выше.

Проведенный на лабораторной теплонасосной установке эксперимент, выявил характер зависимости температуры радиатора теплового насоса от температуры среды, в которую помещен испаритель. Указанная зависимость, хорошо описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом детерминации 0,97 (рисунок 1).

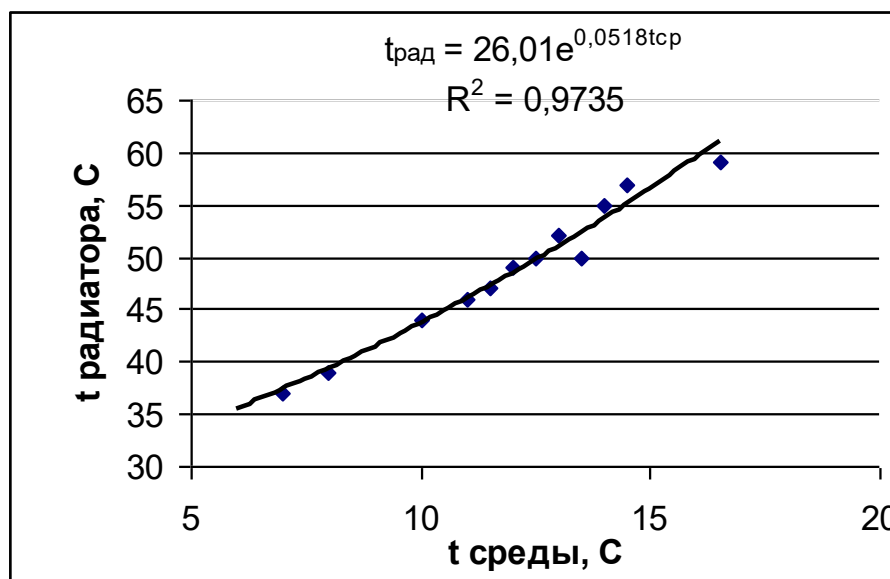


Рис. 1. Характер зависимости температуры радиатора теплового насоса от температуры испарителя / Fig. 1. The nature of the dependence of the temperature of the heat pump radiator on the temperature of the evaporator

Поскольку, теплоотдача радиатора прямо пропорциональна его температуре, полагаем, что и коэффициент теплового преобразования (трансформации) μ имеет такой же характер зависимости от температуры среды испарителя. И, на основе полученных результатов, можно предположить, что значения коэффициента теплового преобразования (трансформации) изменяются по тому же закону, что и температура, пропорционально ей. Из опыта эксплуатации известно, что при $T_{\text{окр. ср.}} = 5^\circ\text{C}$, коэффициент тепловой трансформации составляет около 2,5, следовательно:

при $T_0 = 10^\circ\text{C}$ $\mu = 3,02$; при $T_0 = 30^\circ\text{C}$ $\mu = 5,53$;

при $T_0 = 15^\circ\text{C}$ $\mu = 3,52$; при $T_0 = 35^\circ\text{C}$ $\mu = 6,43$;

при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ $\mu = 4,09$; при $T_0 = 40^\circ\text{C}$ $\mu = 7,47$.

при $T_0 = 25^\circ\text{C}$ $\mu = 4,75$.

В этом случае видно, что коэффициент теплового преобразования (трансформации) уже при температуре среды 20°C может достигать значительной величины. Такой тепловой насос легко сможет выступать выгодной альтернативой классическому газовому отоплению.

Полученные значения коэффициента теплового преобразования в лабораторной установке подтверждают теоретические предположения. Результаты теоретических и экспериментальных расчетов представлены на рисунке 2.

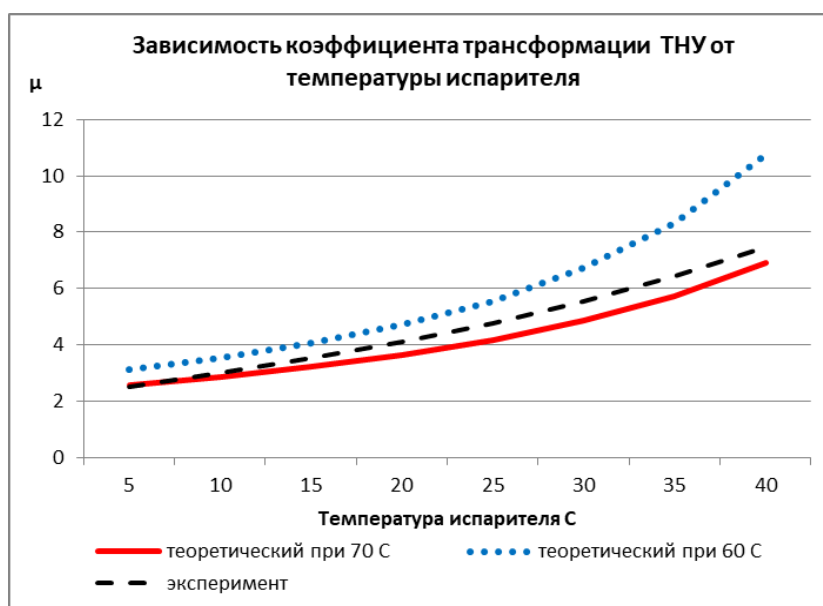


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая зависимость коэффициента теплового преобразования от температуры окружающей среды / Fig. 2. Experimental and theoretical dependence of the thermal conversion coefficient on the ambient temperature

Таким образом, коэффициент теплового преобразования для нашего случая может составлять 7 единиц и более, что говорит о высокой эффективности таких систем.

Предварительный технико-экономический анализ по известным методикам расчета [6], даже для неблагоприятных условий, позволяет сделать вывод о том, что разница в стоимости, предложенной нами системы и системы классического газового или центрального отопления, окупит себя менее чем за 7 лет. Экономический эффект в данном случае связан с исключением затрат на газовое топливо как в зимний период (отопление и горячее водоснабжение), так и в летний (горячее водоснабжение). Рентабельность при реализации проекта ожидается не менее 15 %.

Заключение / Conclusion. Применение тепловых насосов для отопления помещений в сравнении с классическим газовым отоплением далеко не всегда экономически целесообразно. При использовании в качестве источника низкопотенциального тепла (НТП) грунта или открытого водоема с температурой $4...5^\circ\text{C}$ позволяет получить коэффициент теплового преобразования на уровне $2...3$ единицы. Это при современной стоимости электрической энергии, затрачиваемой на привод теплового насоса, не позволяет говорить об экономической эффективности таких систем. Один из путей повы-

шения эффективности теплового насоса – использование НТП с большим потенциалом, иначе говоря, с более высокой температурой. Таким источником может служить биомасса, температура ферментации которой может достигать 60 °С, а в среднем ее температура составляет 30...40 °С. При использовании такого НТП коэффициент преобразования теплового насоса достигает 5...7, что позволяет его использовать в качестве альтернативы газовому отоплению. Проведенные эксперименты подтверждают теоретические расчеты коэффициента преобразования, и можно говорить об экономической эффективности применения таких теплонасосных установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Амерханов Р. А. Тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 2005. 159 с.
2. Мартыновский В. С. Тепловые насосы. Л.: Госэнергоиздат, 1955. 191 с.
3. Васильев Г. П., Шилкин Н. В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах // АВОК Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная физика. 2003. № 2. С. 52–62.
4. Петров Д. В., Петров А. В., Ушкур Д. Г. Повышение эффективности тепловых насосов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011. № 9. С. 22–23.
5. Петров Д. В., Ушкур Д. Г., Петров А. В. Тепловой насос на органических отходах // Сельский механизатор. 2012. № 1. С. 32.
6. Хорольский В. Я., Таранов М. А., Петров Д. В. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. 660300 Агроинженерия. Ставрополь: АГРУС, 2004. 168 с.

REFERENCES

1. Amerkhanov RA. Heat pumps. Moscow: Energoatomizdat; 2005. 159 p. (In Russ.).
2. Martynovsky VS. Heat pumps. Leningrad: Gosenergoizdat; 1955. 191 p. (In Russ.).
3. Vasiliev GP, Shilkin NV. The use of low-potential thermal energy of the earth in heat pump systems. AVOK Ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha = AVOK Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction physics, teplosnabzhenie i stroitel'naya fizika. 2003;(2):52-62. (In Russ.).
4. Petrov DV, Petrov AV, Ushkur DG. Improving the efficiency of heat pumps. Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva = Mechanization and electrification of agriculture. 2011;(9):22-23. (In Russ.).
5. Petrov DV, Ushkur DG, Petrov AV. Heat pump on organic waste. Sel'skij mekhanizator = Rural mechanizer. 2012;(1):32. (In Russ.).
6. Khorolsky VYa, Taranov MA, Petrov DV. Feasibility study of diploma projects: studies. a manual for university students studying in the field of training. 660300 Agroengineering. Stavropol: AGRUS; 2004. 168 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Денис Васильевич Петров – кандидат экономических наук, доцент кафедры автоматизированных электро-энергетических систем и электроснабжения инженерного института Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: JXM-1149-2024

Роман Евгеньевич Бережной – студент 2-го курса магистратуры, кафедра автоматизированных электро-энергетических систем и электроснабжения инженерного института Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: IIS-7512-2023

Владимир Владимирович Сакунов – студент 2-го курса магистратуры, кафедра автоматизированных электро-энергетических систем и электроснабжения инженерного института Северо-Кавказского федерального университета

ВКЛАД АВТОРОВ

Денис Васильевич Петров

Описание теоретических аспектов предлагаемого способа повышения эффективности теплонасосных установок (ТНУ), выработка основных направлений возможного практического применения указанного способа. Утверждение окончательного варианта структуры и содержания статьи.

Роман Евгеньевич Бережной

Теоретический расчет коэффициентов теплового преобразования теплонасосных установок. Подготовка и редактирование текста статьи. Формирование ее окончательного варианта.

Владимир Владимирович Сакунов

Проведение эксперимента и его математическая обработка.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Petrov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: JXM-1149-2024

Roman E. Berezhtoy – 2nd year Master's student of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: IIS-7512-2023

Vladimir V. Sakunov – 2nd year Master's student of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Denis V. Petrov

Description of the conceptual aspects of carrying out the conclusion of the efficiency of HPI (heat pump installations), development of the basic principles of possible practical application of the identified output. Approval of the final version of the structure and content of articles.

Roman E. Berezhtoy

Theoretical calculation of thermal conversion coefficients of HPP (heat pump installations). Preparation and editing of the article text. The formation of its final version.

Vladimir V. Sakunov

Conducting the experiment and its mathematical processing.