

УДК 697.97–5

Энергомоделирование и экспериментальная верификация режимов работы теплового насоса при утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Часть 2. Энергетические, экономические и экологические показатели

В. А. НИКИТИНА¹, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН,
канд. техн. наук С. С. МУРАВЕЙНИКОВ, канд. техн. наук А. А. НИКИТИН, К. МАКАТОВ
Университет ИТМО

¹E-mail: veronika97nikitina@gmail.com

Рассмотрены сравнительные характеристики двух вариантов использования теплового насоса, интегрированного в систему вентиляции: с рекуперацией теплоты вытяжного воздуха и с использованием наружного воздуха в качестве источника низкопотенциальной теплоты. Энергомоделирование режимов работы теплонасосной установки за отопительный период в климатических условиях Санкт-Петербурга выполнялось после верификации расчетной методики по результатам физического эксперимента. Результат моделирования выявил значительный потенциал использования предложенной системы в трех аспектах: энергетическом, экономическом и экологическом. Показатели энергоэффективности данной системы за отопительный период для условий Санкт-Петербурга при средней теплопроизводительности порядка 22 кВт составляют: COP повышается на 27,57%, сэкономленная электроэнергия приносит выгоду 2212,72 \$, выбросы CO₂ сокращаются на 15749,32 кг, окупаемость системы составляет 2–2,2 года.

Ключевые слова: энергомоделирование, теплота вытяжного воздуха, тепловой насос, энергоэффективность.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 28.08.2023, одобрена после рецензирования 15.09.2023, принята к печати 18.01.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Никитина В. А., Сулин А. Б., Муравейников С. С., Никитин А. А., Макатов К. Энергомоделирование и экспериментальная верификация режимов работы теплового насоса при утилизации теплоты вытяжного воздуха. Часть 2. Энергетические, экономические и экологические показатели // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 43–49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49

Energy modeling and experimental validation of heat pump operating modes in exhaust air heat recovery. Part 2. Energy, economic and environmental indicators

V. A. NIKITINA¹, D. Sc. A. B. SULIN, Ph. D. S. S. MURAVEINIKOV,
Ph. D. A. A. NIKITIN, K. MAKATOV

ITMO University

¹E-mail: veronika97nikitina@gmail.com

Comparative characteristics of two options for using a heat pump integrated into the ventilation system are considered: the one with heat recovery from exhaust air and another one with the use of outside air as a low-potential source. Energy modeling of the operating modes of the heat pump installation for the heating period in the climatic conditions of St. Petersburg was carried out after verification of the calculation method based on the results of a physical experiment. The simulation result revealed a significant potential for using the proposed system in three aspects: energy, economic, and environmental. The energy efficiency indicators of this system for the heating period for the conditions of St. Petersburg with an average heating capacity of about 22 kW are: COP is increased by 27.57%, the saved electricity brings a benefit of \$ 2212.72, CO₂ emissions are reduced by 15749.32 kg, the payback of the system is 2–2.2 years.

Keywords: energy modeling, extract air heat, heat pump, energy efficiency.

Article info:

Received 28/08/2023, approved after reviewing 15/09/2023, accepted 18/01/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49

Article in Russian

For citation:Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveinikov S. S., Nikitin A. A., Makatov K. Energy modeling and experimental validation of heat pump operating modes in exhaust air heat recovery. Part 2. Energy, economic and environmental indicators. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 1. p. 43–49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49**Введение**

В работе проводится энергетический, экономический и экологический расчет системы за отопительный период для климата Санкт-Петербурга. Для сокращения потребления энергии необходимо перераспределять нагрузки в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений и использовать вторичные ресурсы [1]–[3]. Потребление электроэнергии и выбросы углекислого газа могут быть значительно сокращены с применением энергоэффективных схем систем вентиляции и кондиционирования воздуха, оснащенных энергосберегающими технологиями, эффективность которых может быть обоснована путем моделирования динамических режимов работы систем [4, 5]. Интеграция возобновляемых источников имеет решающее значение для обезуглероживания и снижения выбросов в строительном секторе. Правительство Китая, например, предложило определенный технический стандарт для зданий с почти нулевым потреблением энергии, в которых выработка энергии возобновляемыми источниками будет равна или превышать потребление энергии [6].

Любые устройства необходимо сравнивать и анализировать в конкретных условиях эксплуатации [7]. В данной работе исследование проводится для климатических условий Санкт-Петербурга. Согласно онлайн ресурсу Администрации города [8] средняя температура воздуха в Санкт-Петербурге составляет 4,3 °С. Самым холодным месяцем считается февраль со средней температурой –7,9 °С. Как правило, отопительным периодом является диапазон с октября по апрель, т. е. отопительный период в Санкт-Петербурге занимает больше половины времени года (58,3%). Таким образом, в Санкт-Петербурге целесообразно применение систем с задействованием такого ресурса низкопотенциальной теплоты как теплота вытяжного воздуха [9]. При этом эксплуатация агрегата может проводиться как в холодный, так и в теплый период года, поскольку режим работы может реверсироваться без установки дополнительного оборудования. Следует отметить, что данное техническое решение позволяет избежать изменения внешнего облика здания, что особенно важно при модернизации охраняемых объектов культурного наследия [10].

Выполненные исследования подтверждают, что взаимодействие между механической приточно-вытяжной вентиляцией и тепловым насосом с рекуперацией тепла позволяет обеспечить требуемое качество воздуха в помещении и достичь энергоэффективности в холодном климате [11, 12, 13].

Цель данного исследования заключается в оценке энергоэффективности системы вентиляции и кондиционирования

воздуха с интегрированным тепловым насосом для рекуперации теплоты вытяжного воздуха. В работе проводится энергетический, экономический и экологический анализ систем.

Результаты моделирования работы системы за отопительный период

Моделирование выполнялось для систем с рекуперацией и без рекуперации теплоты вытяжного воздуха за отопительный период с октября по апрель. Проведение моделирования за обозначенный период стало возможным благодаря верификации модели системы на основании измеренных данных, где среднее отклонение не превысило 5 %. Температура низкопотенциального источника в виде вытяжного воздуха была усреднена и установлена как 22 °С. Температура воздуха на улице менялась от –21,6 до 12,8 °С. Температура наружного воздуха для города Санкт-Петербург была взята из погодного файла, который является задокументированным метеорологическим наблюдением, сформированным в виде базы данных, которую предоставляет многолетний проект ASHRAE «International Weather for Energy Calculations» [14].

Результаты моделирования работы систем с рекуперацией и без рекуперации теплоты вытяжного воздуха за отопительный период представлены на рис. 1. Установлено, что система с рекуперацией эффективней на 27,57%, чем система без рекуперации. При этом средние значения COP за отопительный период составляют: с рекуперацией — 2,324; без рекуперации — 1,684.

На рис. 2 приведены результаты расчета производительности испарителя за отопительный период.

Установлено, что при применении рекуперации теплоты вытяжного воздуха, производительность испарителя возрастает на 28,40%.

При этом средние значения производительности испарителя за отопительный период составляют: с рекуперацией 13,614 кВт; без рекуперации 9,747 кВт.

В моделировании системы с рекуперацией и без рекуперации теплоты вытяжного воздуха производительность конденсатора была установлена одинаковой для того, чтобы сравнительное моделирование работы теплового насоса выполнялось при одинаковой тепловой нагрузке (рис. 3). Среднее значение производительности конденсатора за отопительный период составляет 24,470 кВт.

На графике, представленном на рис. 4, видно, что в системе с рекуперацией нагрузка на компрессор снижается на 26,27%.

Средние значения мощности компрессора: с рекуперацией 10,855 кВт; без рекуперации 14,723 кВт.

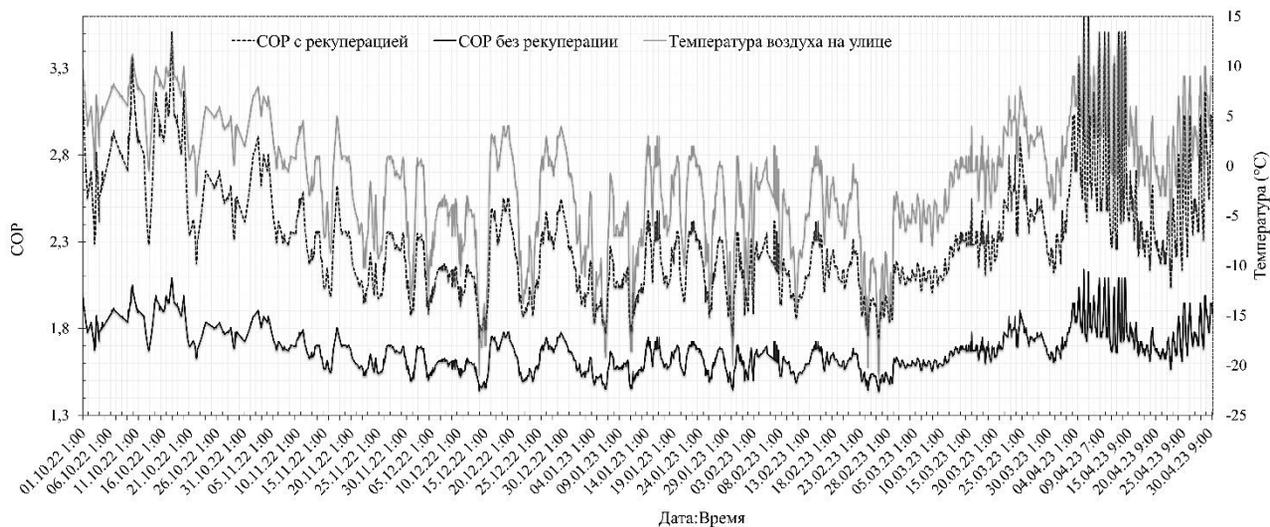


Рис. 1. Сравнение значений COP за моделируемый период
 Fig. 1. Comparison of COP values for the simulated period

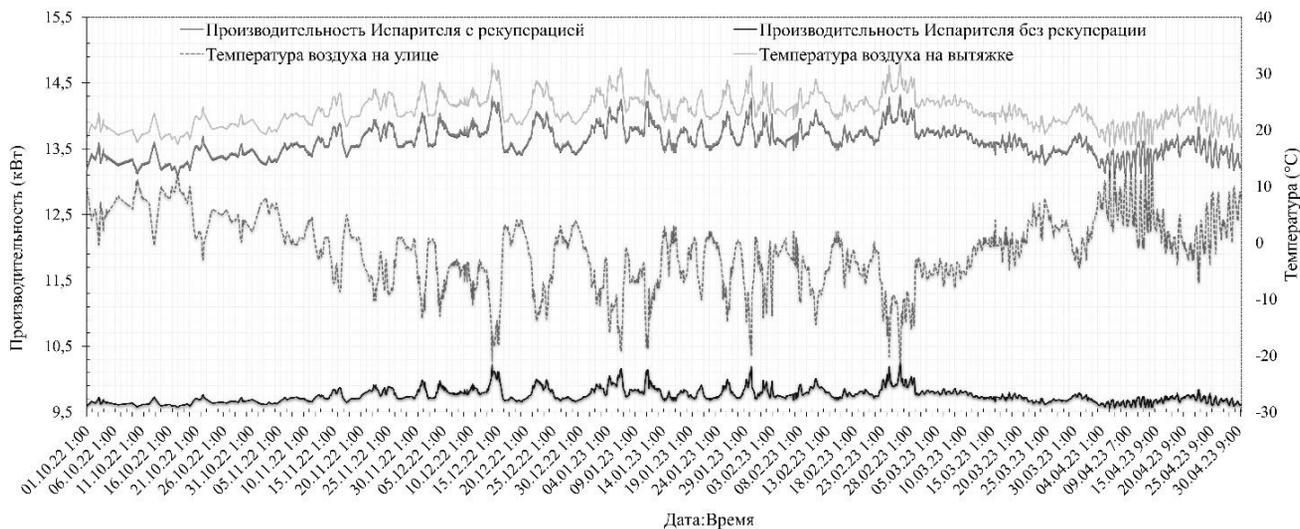


Рис. 2. Производительность испарителя
 Fig. 2. Evaporator capacity



Рис. 3. Производительность конденсатора
 Fig. 3. Condenser capacity

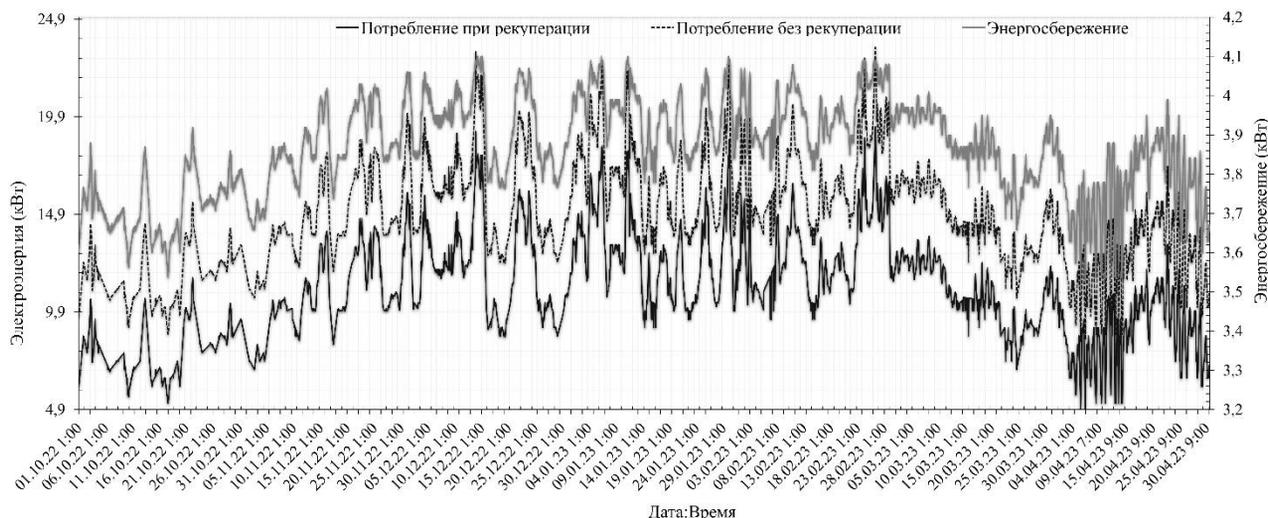


Рис. 4. Потребление электроэнергии компрессором
 Fig. 4. Compressor power consumption

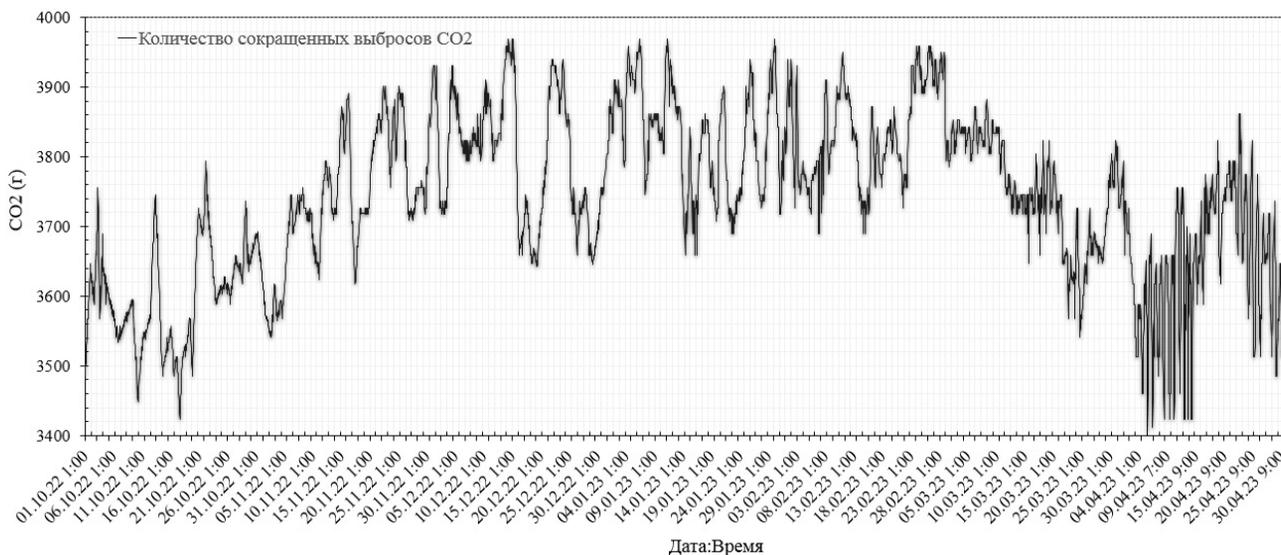


Рис. 5. График сокращения количества выбросов CO₂ при использовании рекуперации
 Fig. 5. CO₂ emission reductions using recuperation

Таким образом, за отопительный период энергопотребление компрессора снизилось на 16269,96 кВт·ч.

Снижение энергозатрат позволяет сократить как финансовые расходы, так и выбросы углекислого газа в окружающую среду.

Сэкономленные финансовые затраты за отопительный период составили 2212,72 \$. Расчет проводился по формуле [15]:

$$\text{Cost}_{\text{Energy}} = C_e \cdot ES,$$

где C_e — стоимость электроэнергии (0,136 \$/кВт·ч); ES — сэкономленная электроэнергия в размере 16269,96 кВт·ч.

Снижение выбросов углекислого газа за отопительный период составило 15749,32 кг (рис. 5). Формула расчета [15]:

$$M_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2} \cdot ES,$$

где μ_{CO_2} — удельное значение выброса CO₂ на 1 кВт·ч 968 г/кВт·ч.

Для оценки срока окупаемости системы рекуперации теплоты вытяжного воздуха с тепловым насосом выполнен расчет показателя *Net Present Value* (NPV):

$$\text{NPV} = -C_0 + \frac{I_{\text{tot}}}{(1+i)^y},$$

где C_0 — стоимость компонентов системы; I_{tot} — прибыль от применения системы; y — количество лет использования.

Капитальные затраты на доработку системы с рекуперацией теплоты вытяжного воздуха складываются из следующих составляющих:

1. Два вентилятора прямоугольных канальных (SHUFT RFD 500×300–4 VIM (935,06 \$)).
2. Воздуховод 30 метров (500×300 мм, $L=1200$ мм, оц. 0,5 шт20/шт20 (685,60 \$)).

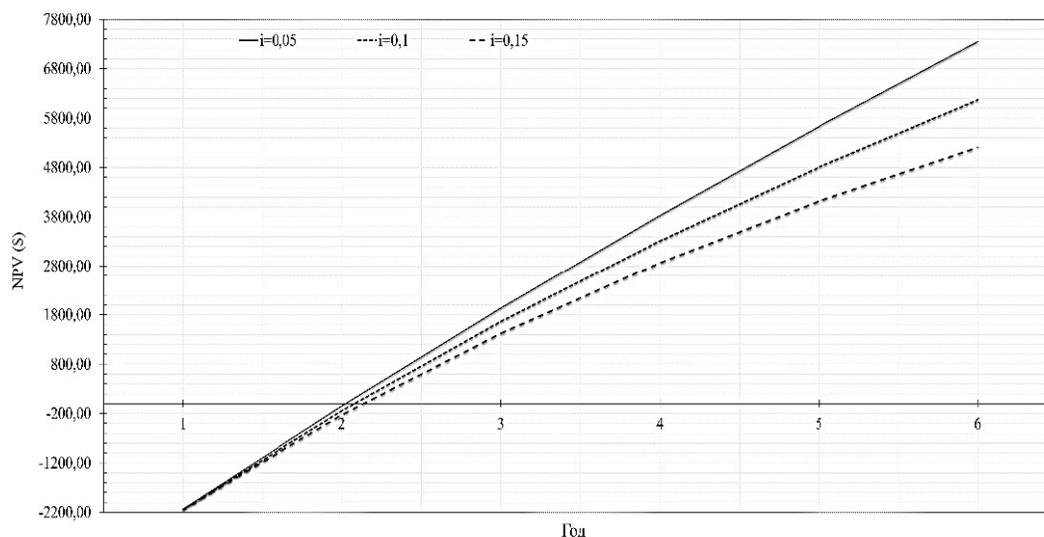


Рис. 6. График NPV в зависимости от стоимости, прибыли и количества лет эксплуатации системы при определенной процентной ставке

Fig. 6. NPV depending on the cost, profit and number of years of operation of the system at a certain interest rate

3. Медные трубы 10 метров (Ballu Olympic 15,88 × 0,75 × 15000 (5/8) (10,90 \$)).

4. Щит управления приточно-вытяжной системой вентиляции с электрическим калорифером (ЩУВ 18-Э13-B115-ЭКО (506,54 \$)).

Капитальные затраты на систему составляют 2138,1 \$.

Рентабельность исследуемой системы определяется с использованием параметра чистой приведенной стоимости (NPV) [16]:

$$NPV = -C_0 + \sum_{y=1}^n \frac{I_{tot}}{(1+i)^y},$$

где C_0 , y и i — капитальные затраты системы, срок службы системы и процентная ставка, соответственно; I_{tot} — прибыль от системы.

Расчетный минимальный срок окупаемости системы при процентной ставке 5 % составит 2 года, при ставке 15 % — 2,2 года (рис. 6). Процентная ставка определяется банком.

Литература

1. Горшков А. С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 1. С. 9–13.
2. Vakiloroyaya V. et al. A review of different strategies for HVAC energy saving // Energy conversion and management. 2014. vol. 77. p. 738–754.
3. Табакова А. С., Новикова О. В. Повышение эффективности теплотребления здания при применении современных систем вентиляции // Неделя науки СПбПУ. 2015. С. 135–138.
4. Gaudiano P. Agent-based simulation as a tool for the built environment // Annals of the New York Academy of Sciences. 2013. vol. 1295. no 1. p. 26–33.
5. Herrmann C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems — Concept and application // CIRP annals. 2011. vol. 60. no 1. p. 45–48.

Заключение

Результаты исследования работы встроенного теплового насоса для рекуперации теплоты вытяжного воздуха за отопительный период выявили существенный потенциал, который выражается как в энергетическом, так и в финансовом и экологическом аспектах.

Предложенный вариант системы вентиляции с интегрированным тепловым насосом с рекуперацией теплоты вытяжного воздуха является эффективным решением в сравнении с обычной системой без рекуперации теплоты. Показатели энергоэффективности данной системы за отопительный период для условий Санкт-Петербурга при средней теплопроизводительности порядка 22 кВт составляют:

- COP повышается на 27,57%;
- сэкономленная электроэнергия приносит выгоду 2212,72 \$;
- выбросы CO₂ сокращаются на 15749,32 кг;
- окупаемость системы составляет 2–2,2 года.

References

1. Gorshkov A. S. Energy efficiency in construction: issues of regulation and measures to reduce the energy consumption of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No 1. P. 19–13. (in Russian)
2. Vakiloroyaya V. et al. A review of different strategies for HVAC energy saving. *Energy conversion and management*. 2014. vol. 77. p. 738–754.
3. Tabakova A. S., Novikova O. V. Improving the efficiency of building heat consumption with the use of modern ventilation systems. *Week of Science SPbPU*. 2015. (in Russian)
4. Gaudiano P. Agent-based simulation as a tool for the built environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2013. vol. 1295. no 1. p. 26–33.
5. Herrmann C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems — Concept and application. *CIRP annals*. 2011. vol. 60. no 1. p. 45–48.

6. Lin Y. et al. Towards zero-energy buildings in China: A systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. vol. 276. p. 123297.
7. Muraveinikov S. S. et al. Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2019. vol. 2141. no 1. p. 030019.
8. Администрация Санкт-Петербурга: официальный сайт. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс]: <https://www.gov.spb.ru/helper/day/klimat/> (дата обращения 12.09.2022).
9. Никитин А. А., Муравейников С. С., Крылов В. А. Перспективы использования тепловых насосов в системах вентиляции // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*. 2016. № 4. С. 57–61.
10. Губина И. А., Горшков А. С. Энергосбережение в зданиях при утилизации тепла вытяжного воздуха // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 4. С. 209–219.
11. Nikitina V. A., Nikitin A. A., Sulin A. B., Ryabova T. V., Makatov K. Analysis of the heat recovery potential in the classroom // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, Vol. 866, No. 1, pp. 012012.
12. Sulin A. B. et al. Energy performance analysis of the temperature control system of an object with a random principle of thermal perturbations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. vol. 939. no 1. p. 012075.
13. Никитина В. А., Сулин А. Б., Муравейников С. С., Никитин А. А., Макашов К. Энергомоделирование и экспериментальная верификация режимов работы теплового насоса при утилизации теплоты вытяжного воздуха. Часть 1. Схемные решения и расчетная модель. // *Вестник Международной академии холода*. 2023. № 4. С. 3–10. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-3-10
14. ASHRAE «International Weather for Energy Calculations» — URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-international-weather-files-for-energy-calculations-2-0-iwec2> (дата обращения: 01.08.2023).
15. Deymi-Dashtebayaz M., Valipour-Namanlo S. Thermoeconomic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump // *Journal of Cleaner Production*. 2019. vol. 219. p. 117–126.
16. Deymi-Dashtebayaz M. et al. A new multigenerational solar energy system integrated with near-zero energy building including energy storage — A dynamic energy, exergy, and economic-environmental analyses // *Energy Conversion and Management*. 2022. vol. 261. p. 115653.

Сведения об авторах

Никитина Вероника Александровна

Аспирант, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, veronika97nikitina@gmail.com

Сулин Александр Борисович

Д. т. н., профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru

Information about authors

Nikitina Veronika A.

Postgraduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, veronika97nikitina@gmail.com

Sulin Aleksandr B.

D. Sc., Professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru

Муравейников Сергей Сергеевич

К. т. н., доцент образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы» Университета
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
ssmuraveinikov@itmo.ru

Никитин Андрей Алексеевич

К. т. н., доцент образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы» Университета
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
aanikitin@itmo.ru

Макатов Кирилл

Аспирант, инженер образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы» Университета
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
kmakatov@itmo.ru

Muraveinikov Sergey S.

Ph. D., Associate professor of Educational Center «Energy
Efficient Engineering Systems» of ITMO University,
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
ssmuraveinikov@itmo.ru

Nikitin Andrey A.

Ph. D., Associate professor of Educational Center «Energy
Efficient Engineering Systems» of ITMO University,
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
aanikitin@itmo.ru

Makatov Kirill

Postgraduate student of Educational Center «Energy
Efficient Engineering Systems» of ITMO University,
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
kmakatov@itmo.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник МАХ»

- В начале статьи, слева – УДК;
- После названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации (e-mail);
- Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи. Рекомендуемый объем 150-200 слов на русском и английском языках. Ключевые слова – 5-7.
- **Статья должна быть структурирована:**
Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, провести краткий анализ известных из научной литературы решений (со ссылками на источники), дать критику их недостатков, показать научную новизну и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.
В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи должен быть разбит на содержательные разделы.
- **В заключении (Выводы)** необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований и области применения.
- статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word на одной стороне листа через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- объем статьи 15–20 страниц (формат А4, вертикальный, 210x297 мм), включая аннотацию, рисунки, литературу; поля: левое – 2 см, правое – 2 см, верхнее – 2 см, нижнее – 2 см;
- формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation), **не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab.**
- Список литературных источников должен быть оформлен по ГОСТу и содержать ссылки только на опубликованные работы. Количество пристатейных ссылок не менее 15-20.

Данные об аффилировании авторов (author affiliation).

На отдельной странице предоставляются сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, должности основного места работы (учебы); наименование и почтовые адреса учреждений, в которых работают авторы, e-mail, ORCID; Scopus ID; РИНЦ ID

Статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на электронный адрес редакции vestnikmax@rambler.ru

Плата за публикации не взимается

Дополнительная информация для авторов на сайте <http://vestnikmax.com>