

УДК 697.978:621.577.6

© В. А. Пухкал, канд. техн. наук, доцент
© М. М. Петров, аспирант
© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: pva1111@rambler.ru, michaelpetrov1998@yandex.ru
© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор
(Национальный исследовательский университет
ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: tsygaav@hotmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-143-149

© V. A. Pukhkal, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© M. M. Petrov, post-graduate student
© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: pva1111@rambler.ru, michaelpetrov1998@yandex.ru
© A. V. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(ITMO University, St. Petersburg, Russia)
E-mail: tsygaav@hotmail.com

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

CRITERION DEPENDENCE FOR DETERMINATION OF ACTUAL CONVERSION FACTOR OF SINGLE-STAGE HEAT PUMP

Применение теплонасосных установок в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения зданий различного назначения эффективно для целей теплоснабжения при использовании возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов. Для предварительного анализа эффективности применения тепловых насосов получена обобщенная критериальная зависимость действительного коэффициента преобразования энергии от критерия Клаузиуса, характеризующего свойства хладагентов. Для получения зависимости выполнены испытания одноступенчатого теплового насоса на хладагенте R134a. Проведено сравнение с известными литературными данными. Зависимость может применяться для современных хладагентов R407C, R404A, R410A.

Ключевые слова: тепловой насос, действительный коэффициент преобразования, критерий Клаузиуса.

The use of heat pump installations in heating, ventilation, air conditioning and hot water supply systems of buildings for various purposes is efficient for heat supply purposes when using renewable energy sources and secondary energy resources. For the preliminary analysis of the efficiency of using heat pumps, there was obtained a generalized criterion dependence of the actual energy conversion coefficient on the Clausius criterion characterizing the properties of refrigerants. To obtain the dependence, the single stage heat pump was tested on R134a refrigerant. Comparison analysis with well known data from special literature was made. The relationship can be applied to modern refrigerants R407C, R404A, R410A.

Keywords: heat pump, actual conversion factor, Clausius criterion.

Введение

В системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения зданий различного назначения для целей теплоснабжения применяются тепловые насосы, использующие возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и вторичные энергоресурсы (ВЭР) [1–15]. Одной из основных характеристик тепловых насосов

является действительный коэффициент преобразования энергии, определяемый по зависимости [16]:

$$K_T = Q_T / N_K, \quad (1)$$

где K_T — действительный коэффициент преобразования энергии, Вт/Вт; Q_T — теплопроизводительность (тепловой поток) цикла, Вт; N_K — мощность компрессора теплового насоса, Вт.

При анализе эффективности применения тепловых насосов в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха необходимо иметь зависимость для определения действительного коэффициента преобразования энергии. Эта зависимость должна учитывать влияние теплофизических свойств и температур насыщения хладагента при давлении в испарителе и конденсаторе на энергетическую эффективность использования тепловых насосов.

Для предварительной оценки энергетических показателей теплового насоса применяются ориентировочные эмпирические зависимости для действительного коэффициента преобразования, в которые входят только температуры насыщения хладагента при давлении в испарителе и конденсаторе [17, 18]:

$$K_T = 0,74 \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{и}}} - \left(0,0032T_{\text{и}} + 0,765 \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{к}}} \right) + 0,9, \quad (2)$$

где $T_{\text{и}}$ — температура насыщения хладагента при давлении в испарителе, К; $T_{\text{к}}$ — температура насыщения хладагента при давлении в конденсаторе, К.

Зависимость (2) получена для установок с поршневыми машинами с диаметром цилиндра около 150 мм.

В работе [19] для хладагента R22 приведена зависимость

$$K_T = \left[0,0614 + 0,003917(T_{\text{к}} - T_{\text{и}}) \right]^{-1}. \quad (3)$$

На основе анализа экспериментальных исследований в [20] сделан вывод о необходимости получения такой зависимости для каждого варианта рабочего тела, которая, например, для хладагента R134 получена в виде

$$K_T = 17,6 \cdot e^{-28,13 \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{и}}}{T_{\text{к}}}} + 0,655. \quad (4)$$

Обобщение результатов исследований систем с теплонасосными установками (ТНУ) позволило предложить зависимость [21, 22] действительного коэффициента преобразования от критерия Клаузиуса, характеризующего свойства хладагентов:

$$K_T = 2,48 \cdot Cl^{0,42}, \quad (5)$$

где $Cl = \frac{r_{\text{к}}}{c_p(T_{\text{к}} - T_{\text{и}})}$ — критерий Клаузиуса; $r_{\text{к}}$ — удельная теплота фазового перехода, кДж/кг; c_p — удельная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг · К).

Зависимость (5) действительна для хладагентов R12, R142 и их смеси в соотношении 3 : 1 при диапазонах:

- температур $t_{\text{и}}$ насыщения хладагента при давлении в испарителе: $t_{\text{и}} = -5 \dots 10$ °С;
- температур $t_{\text{к}}$ насыщения хладагента при давлении в конденсаторе: $t_{\text{к}} = 50 \dots 90$ °С;
- значений критерия Клаузиуса $Cl = 1,6 \dots 5,0$.

В работе [23] при обработке 32 опытов численного эксперимента для современных хладагентов в зависимости от определения действительного коэффициента преобразования учтено влияние потерь давления хладагента в испарителе, конденсаторе и в линии всасывания:

$$K_T = 2,78 \cdot Cl^{0,302} \cdot \Delta P_{\text{и}}^{-0,025} \cdot \Delta P_{\text{к}}^{0,001} \cdot \Delta P_{\text{вс}}^{-0,055}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{и}}$ — потери давления в испарителе теплового насоса, кПа; $\Delta P_{\text{к}}$ — потери давления в конденсаторе теплового насоса, кПа; $\Delta P_{\text{вс}}$ — потери давления в линии всасывания, кПа.

Условия применения зависимости (6):

- хладагенты — R134a, R407C, R404A, R410A;
- диапазон изменения критерия Клаузиуса $Cl = 1,2 \dots 2,5$;
- потери давления в испарителе $\Delta P_{\text{и}} = 20 \dots 60$ кПа;
- потери давления в конденсаторе $\Delta P_{\text{к}} = 10 \dots 40$ кПа;
- потери давления в линии всасывания $\Delta P_{\text{вс}} = 20 \dots 50$ кПа.

Величины потерь давления хладагента соответствуют реальным значениям при эксплуатации тепловых насосов.

Таким образом, для расчета действительного коэффициента преобразования теплового насоса отсутствуют обобщающие (критериальные) зависимости для современных

хладагентов, а приведенные в литературе данные не имеют экспериментального подтверждения. В настоящей работе поставлена цель экспериментального определения обобщенной зависимости для действительного коэффициента преобразования энергии теплового насоса.

Методы

Влияние на коэффициент преобразования теплового насоса большого числа факторов существенно затрудняет анализ и установление обобщающего выражения. Возможности теоретического исследования пока ограничены, что приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований.

Исследования проведены на экспериментальном лабораторном стенде, описание которого приведено в предыдущей нашей работе [24]. Одноконтурный тепловой насос работает на хладагенте R134a.

Как известно, критерий Клаузиуса, характеризующий свойства хладагентов и учитывающий температуры насыщения хладагента при давлении в испарителе и конденсато-

ре, позволяет обобщить экспериментальные данные и применить их для различных хладагентов. Поэтому для обработки данных экспериментальных исследований принята критериальная зависимость действительного коэффициента преобразования от критерия Клаузиуса.

Результаты

При обработке данных экспериментальных исследований получена зависимость действительного коэффициента преобразования от критерия Клаузиуса (рис. 1):

$$K_T = 2,546 \cdot Cl^{0,357}. \quad (7)$$

Диапазоны изменения параметров процессов в тепловом насосе при исследованиях: температура насыщения хладагента при давлении в испарителе — $t_n = -5 \dots 10$ °С; температура насыщения хладагента при давлении в конденсаторе — $t_k = 50 \dots 60$ °С; критерий Клаузиуса $Cl = 1,65 \dots 1,95$.

Обсуждение

Отклонение экспериментальных данных в исследованном диапазоне критерия Клаузиуса от значений, определенных по (5), не более 1,2 % (рис. 2).

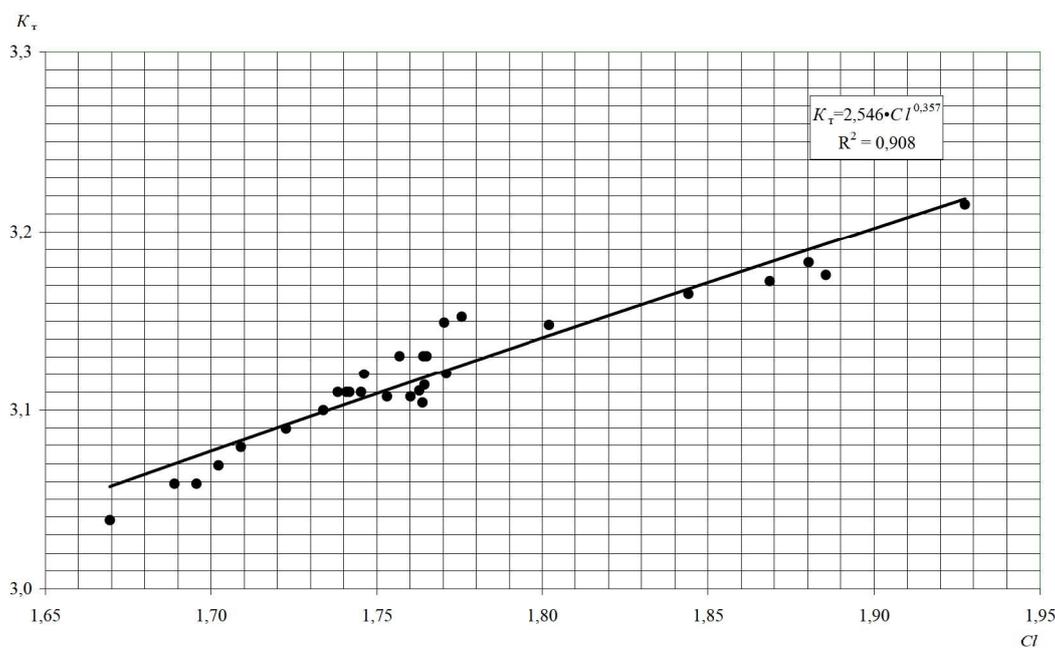


Рис. 1. Результаты обобщения экспериментальных данных в критериальной форме

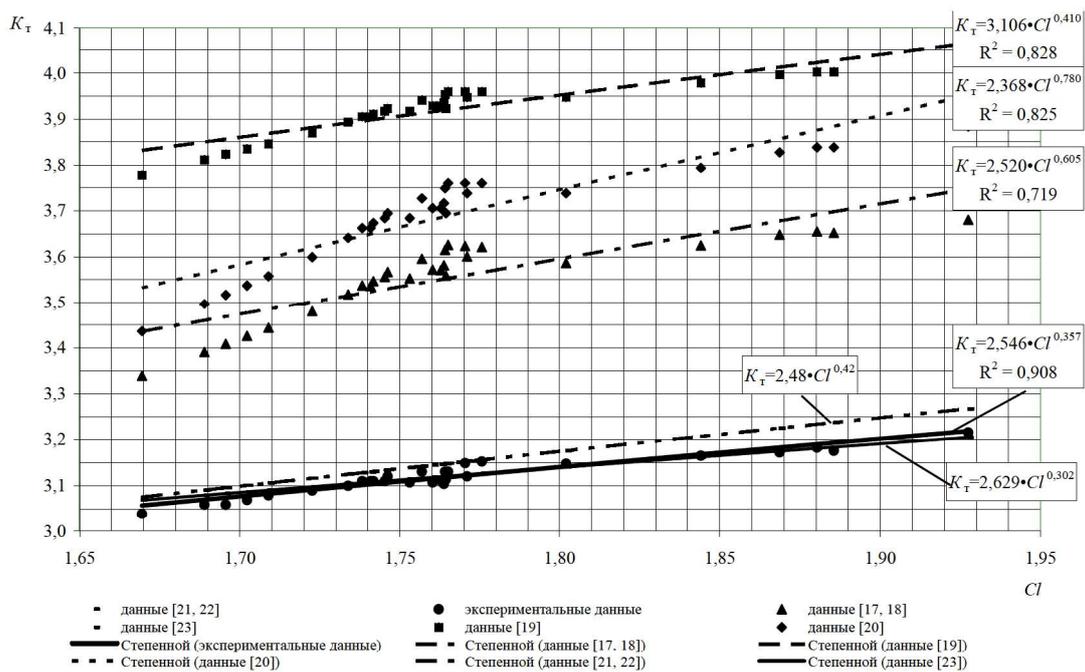


Рис. 2. Сравнение зависимостей действительного коэффициента преобразования энергии от критерия Клаузиуса

Зависимость (6), учитывающая размерные величины потерь давления хладагента в испарителе, конденсаторе и линии всасывания, может быть приведена при учете указанных потерь давления к выражению

$$K_{\tau} = 2,629 \cdot Cl^{0,302}. \quad (8)$$

Отклонение от экспериментальных данных для этой зависимости составляет не более 0,8 %.

Значения действительного коэффициента преобразования, определенные по зависимостям (2)–(4), учитывающим только температуры насыщения хладагента при давлении в испарителе и конденсаторе, превышают экспериментальные данные и не могут приниматься для расчетов энергоэффективности ТНУ.

Выводы

Критериальная зависимость действительного коэффициента преобразования ТНУ от критерия Клаузиуса позволяет оценить влияние теплофизических свойств хладагентов и температур насыщения хладагента при давлении в испарителе и конденсаторе на энергетическую эффективность ТНУ.

Полученная при проведении исследований обобщенная критериальная зависимость может быть использована при предварительном выборе теплонасосной установки для систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения. Зависимость получена для хладагента R134a и может применяться для современных хладагентов R407C, R404A, R410A.

Библиографический список

1. Аверьянов В. К., Уляшева В. М., Киборт И. Д. Анализ результатов моделирования одно- и двухконтурного воздушного теплового насоса // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 164–167.
2. Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Алоян С. М., Зайцева И. А., Виноградова Н. В. Возможный диапазон работы воздушного теплового насоса в отопительный период // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 278–281.
3. Волкова О. С., Пташкина-Гирина О. С., Мартынов А. С. Влияние температуры и влажности атмосферного воздуха на эффективность тепловых насосов // Вестник Московского энергетического ун-та. 2024. № 3. С. 25–30.

4. Здитовецкая С. В. Оценка эффективности циклов парокомпрессионного теплового насоса с альтернативными хладагентами // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2022. № 2. С. 68–73.

5. Киборт И. Д. Сравнительный анализ результатов моделирования теплоутилизационного теплового насоса и классических утилизаторов тепловой энергии удаляемого воздуха // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 157–162.

6. Киборт И. Д. Анализ результатов моделирования соотношения основных показателей работы теплонасосной системы утилизации тепловой энергии удаляемого воздуха // Фундаментальные исследования. 2016. № 9–2. С. 263–267.

7. Муравейников С. С., Сулин А. Б., Никитин А. А., Макатов К. Экспериментальное исследование характеристик активного теплоутилизатора при изменяющихся условиях эксплуатации // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 84–90.

8. Протопопов К. В., Жиребный И. П., Гаранов С. А. Способы регулирования производительности установок кондиционирования воздуха с режимом теплового насоса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12 (657). С. 76–83.

9. Пужкал В. А., Петров М. М. Энергоэффективность приточно-вытяжных установок со встроенным тепловым насосом // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № S1. С. 294–299.

10. Степаненко М. Н., Шелгинский А. Я., Яворовский Ю. В. Энергозатраты при использовании теплоты вентиляционных выбросов // Промышленная энергетика. 2016. № 3. С. 8–14.

11. Уляшева В. М., Киборт И. Д. Об оценке эффективности системы утилизации тепловой энергии удаляемого воздуха на базе теплового насоса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 8 (692). С. 53–58.

12. Чижмакова В. Ю., Яковлев И. В. Применение теплонасосных установок для утилизации теплоты вытяжного воздуха в плавательных бассейнах // Вестник Московского энергетического ин-та. 2013. № 2. С. 31–38.

13. Шунгаров Э. Х., Протопопов К. В., Гаранов С. А. Характеристики спиральных компрессоров для применения в низкотемпературных воздушных тепловых насосах // Холодильная техника. 2019. № 11. С. 28–32.

14. Яковлев И. В., Исхакова А. М. Эффективность применения тепловых насосов типа «воздух–вода» в климатических условиях России // Теплоэнергетика. 2020. № 10. С. 38–47.

15. Яковлев И. В., Исхакова А. М., Парехина И. В. Энергоэффективность перехода на автономное теплоснабжение от воздушных теплонасосных уста-

новок в климатических условиях России // Вестник Московского энергетического ин-та. 2016. № 5. С. 105–112.

16. Цветков О. Б., Бараненко А. В., Лаптев Ю. А. Энерго- и экологически эффективные технологии генерации холода и теплоты. СПб.: Страта, 2018. 292 с.

17. Мартыновский В. С. Анализ действительных термодинамических циклов. М.: Энергия, 1972. 216 с.

18. Мартыновский В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергия, 1979. 288 с.

19. El-Meniawy S. A. K., Watson F. A., Holland F. A. A study of the operating characteristics of a water-to-water heat pump system using R22 // Journal of Heat Recovery Systems. 1981. Vol. 1 (3). Pp. 209–217. URL: [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(81\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0198-7593(81)90013-8)

20. Гуреев В. М. Повышение эффективности теплонасосных установок на основе численного и физического моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2010. 40 с.

21. Везиришвили О. Ш. Характеристики парокомпрессионных холодильных машин в режиме теплонасосных установок // Холодильная техника. 1984. № 8. С. 7–9.

22. Везиришвили О. Ш., Меладзе Н. В. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло- и хладоснабжения. М.: Издательство МЭИ, 1994. 160 с.

23. Мацевитый Ю. М., Братута Э. Г., Харлампиди Д. Х., Тарасова В. А. Системно-структурный анализ парокомпрессорных термотрансформаторов / под общ. ред. Ю. М. Мацевитого; НАН Украины, Институт проблем машиностроения. Харьков, 2014. 269 с.

24. Пужкал В. А., Петров М. М., Анисимов С. М., Цыганков А. В. Экспериментальное исследование теплового насоса // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 1 (108). С. 92–100.

References

1. Aver'yanov V. K., Ulyasheva V. M., Kibort I. D. Analiz rezultatov modelirovaniya odno- i dvukhkонтурного vozdushnogo teplovogo nasosa [Analysis of simulation results of single- and double-circuit air heat pump]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2014, no. 3 (44), pp. 164–167.

2. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Aloyan S. M., Zaytseva I. A., Vinogradova N. V. Vozmozhnyy diapazon raboty vozdushnogo teplovogo nasosa v otopitel'nyy period [Possible operating range of the air heat pump during the heating period]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Bulletin of higher educational institutions. Textile industry technology, 2017, no. 4 (370), pp. 278–281.

3. Volkova O. S., Ptashkina-Girina O. S., Mart'yanov A. S. *Vliyaniye temperatury i vlazhnosti atmosfernogo vozdukha na effektivnost' teplovykh nasosov* [Influence of atmospheric air temperature and humidity on the efficiency of heat pumps]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo un-ta – Bulletin of the Moscow Power Engineering University*, 2024, no. 3, pp. 25–30.
4. Zditovetskaya S. V. *Otsenka effektivnosti tsiklov parokompressionnogo teplovogo nasosa s al'ternativnymi khladagentami* [Evaluation of efficiency of cycles of steam compression heat pump with alternative refrigerants]. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo – Bulletin of GSTU named after P.O. Sukhoy*, 2022, no. 2, pp. 68–73.
5. Kibort I. D. *Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov modelirovaniya teploutilizatsionnogo teplovogo nasosa i klassicheskikh utilizatorov teplovy energii udalyaemogo vozdukha* [Comparative analysis of simulation results of heat recovery heat pump and classical heat recovery units of removed air]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (53), pp. 157–162.
6. Kibort I. D. *Analiz rezul'tatov modelirovaniya sootnosheniya osnovnykh pokazateley raboty teplonasosnoy sistemy utilizatsii teplovy energii udalyaemogo vozdukha* [Analysis of the results of modeling the ratio of the main indicators of the heat pump system operation for the utilization of the removed air thermal energy]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2016, no. 9–2, pp. 263–267.
7. Muraveynikov S. S., Sulin A. B., Nikitin A. A., Makatov K. *Eksperimental'noe issledovanie kharakteristik aktivnogo teploutilizatora pri izmenyayushchikhsya usloviyakh ekspluatatsii* [Experimental study of the characteristics of an active heat recovery agent under changing operating conditions]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda – Bulletin of the International Academy of Cold*, 2022, no. 4, pp. 84–90.
8. Protopopov K. V., Zhirebnyy I. P., Garanov S. A. *Sposoby regulirovaniya proizvoditel'nosti ustanovok konditsionirovaniya vozdukha s rezhimom teplovogo nasosa* [Methods for regulating the performance of air conditioning plants with a heat pump mode]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie – Bulletin of higher educational institutions. Mechanical Engineering*, 2014, no. 12 (657), pp. 76–83.
9. Pukhkal V. A., Petrov M. M. *Energoeffektivnost' pritochno-vytyazhnykh ustanovok so vstroennym teplovyim nasosom* [Energy efficiency of plenum and exhaust plants with built-in heat pump]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' – Construction and technological safety*, 2023, no. S1, pp. 294–299.
10. Stepanenko M. N., Shelginskiy A. Ya., Yavorovskiy Yu. V. *Energozatraty pri ispol'zovanii teploty ventilyatsionnykh vybrosov* [Energy costs when using the heat of ventilation emissions]. *Promyshlennaya energetika – Industrial Energy*, 2016, no. 3, pp. 8–14.
11. Ulyasheva V. M., Kibort I. D. *Ob otsenke effektivnosti sistemy utilizatsii teplovy energii udalyaemogo vozdukha na baze teplovogo nasosa* [On the assessment of the efficiency of the heat energy utilization system of the removed air based on the heat pump]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 8 (692), pp. 53–58.
12. Chizhmakova V. Yu., Yakovlev I. V. *Primenenie teplonasosnykh ustanovok dlya utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukha v plavatel'nykh basseynakh* [Use of heat pump units for utilization of exhaust air heat in swimming pools]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo in-ta – Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2013, no. 2, pp. 31–38.
13. Shungarov E. Kh., Protopopov K. V., Garanov S. A. *Kharakteristiki spiral'nykh kompressorov dlya primeneniya v nizkotemperaturnykh vozdushnykh teplovykh nasosakh* [Characteristics of spiral compressors for use in low-temperature air heat pumps]. *Kholodil'naya tekhnika – Refrigeration Engineering*, 2019, no. 11, pp. 28–32.
14. Yakovlev I. V., Iskhakova A. M. *Effektivnost' primeneniya teplovykh nasosov tipa «vozdukh–voda» v klimaticheskikh usloviyakh Rossii* [Efficiency of air-water heat pumps application in climatic conditions of Russia]. *Teploenergetika – Heat Power Engineering*, 2020, no. 10, pp. 38–47.
15. Yakovlev I. V., Iskhakova A. M., Parekhina I. V. *Energoeffektivnost' perekhoda na avtonomnoe teplosnabzhenie ot vozdushnykh teplonasosnykh ustanovok v klimaticheskikh usloviyakh Rossii* [Energy efficiency of transition to autonomous heat supply from air heat pump installations in climatic conditions of Russia]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo in-ta – Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2016, no. 5, pp. 105–112.
16. Tsvetkov O. B., Baranenko A. V., Laptev Yu. A. *Energo- i ekologicheski effektivnye tekhnologii generatsii kholoda i teploty* [Energy and environmentally efficient technologies for generating cold and heat]. St. Petersburg, Strata Publ., 2018, 292 p.
17. Martynovskiy V. S. *Analiz deystvitel'nykh termodinamicheskikh tsiklov* [Analysis of real thermodynamic cycles]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 216 p.
18. Martynovskiy V. S. *Tsiky, skhemy i kharakteristiki termotransformatorov* [Cycles, schemes and characteristics of thermal transformers]. Ed. by Brodyanskogo V. M. Moscow, Energiya Publ., 1979, 288 p.
19. El-Meniawy S. A. K., Watson F. A., Holland F. A. *A study of the operating characteristics of a water-to-water heat pump system using R22*. *Journal of Heat Recovery Systems*, 1981, vol. 1 (3), pp. 209–217. Available at: [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(81\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0198-7593(81)90013-8)

20. Gureev V. M. *Povyshenie effektivnosti teplonasosnykh ustanovok na osnove chislennogo i fizicheskogo modelirovaniya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of heat pump installations based on numerical and physical modeling. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Kazan, 2010, 40 p.

21. Vezirishvili O. Sh. *Kharakteristiki parokompressionnykh kholodil'nykh mashin v rezhime teplonasosnykh ustanovok* [Characteristics of steam compression refrigerating machines in the mode of heat pump plants]. *Kholodil'naya tekhnika – Refrigeration equipment*, 1984, no. 8, pp. 7–9.

22. Vezirishvili O. Sh., Meladze N. V. *Energoberegayushchie teplonasosnye sistemy teplo-*

i khladosnabzheniya [Energy-saving heat pump systems of heat and cold supply]. Moscow, MEI Publ., 1994, 160 p.

23. Matsevitiy Yu. M., Bratuta E. G., Kharlampidi D. X., Tarasova V. A. *Sistemno-strukturniy analiz parokompressionnykh termotransformatorov* [System-structural analysis of steam compressor thermal transformers]. Ed. by Matsevitogo Yu. M. NAN Ukrainy, Institut problem mashinostroeniya Publ., Kharkov, 2014, 269 p.

24. Pukhkal V. A., Petrov M. M., Anisimov S. M., Tsygankov A. V. *Eksperimental'noe issledovanie teplovogo nasosa* [Experimental study of the heat pump]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2025, no. 1 (108), pp. 92–100.