

© В. А. Пухкал, канд. техн. наук, доцент

© V. A. Pukhkal, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© М. М. Петров, аспирант

© M. M. Petrov, post-graduate student

© С. М. Анисимов, д-р техн. наук, профессор

© S. M. Anisimov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pva1111@rambler.ru, michaelpetrov1998@yandex.ru

E-mail: pva1111@rambler.ru, michaelpetrov1998@yandex.ru

© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор
(Национальный исследовательский университет
ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)

© A. V. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(ITMO University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pva1111@rambler.ru

E-mail: pva1111@rambler.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

EXPERIMENTAL STUDY OF THE HEAT PUMP

Основной принцип работы теплового насоса заключается в передаче теплоты низкопотенциального источника на более высокий температурный уровень. В системах вентиляции и кондиционирования воздуха источником низкопотенциальной теплоты служит удаляемый вентиляционный воздух, а передается теплота приточному воздуху. Отсутствие методики расчета приточно-вытяжных установок с тепловыми насосами затрудняет их расчет и применение. Выполнены испытания теплового насоса на хладагенте R134a. Получены зависимости коэффициента преобразования энергии от температуры низкопотенциального источника при постоянной температуре конденсации хладагента и коэффициента преобразования энергии от разности температур конденсации и кипения хладагента при постоянной температуре. Подтверждена эффективность применения тепловых насосов в системах вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения. Среднее значение коэффициента преобразования составило 3,1.

Ключевые слова: вентиляция, горячее водоснабжение, тепловой насос.

The main principle of the heat pump operation is to transfer the heat of a low-potential source to a higher temperature level. In ventilation and air conditioning systems, the source of low-potential heat is the removed ventilation air, and heat is transferred to the supply air. The lack of methodology for calculating the air handling unit with heat pumps makes their calculation and application difficult. Heat pump has been tested on R134a refrigerant. There have been obtained dependences of energy conversion coefficient on temperature of low-potential source at constant temperature of refrigerant condensation and energy conversion coefficient on difference of temperatures of refrigerant condensation and boiling at constant temperature of refrigerant boiling. The effectiveness of using heat pumps in ventilation, air conditioning and hot water supply systems has been confirmed. The average conversion factor was 3.1.

Keywords: ventilation, hot water supply, heat pump.

Введение

Проблема использования низкопотенциальной теплоты удаляемого вентиляционного воздуха может быть решена при применении теплового насоса (ТН) в приточно-вытяжных вентиляционных установках [1–14]. Тепловые насосы за счет использования внешней работы повышают потенциал источников теп-

лоты, обычно имеющих температуру 0...40 °С (называемых низкопотенциальными), до требуемых параметров в системах вентиляции и горячего водоснабжения (50...60 °С), называемых высокопотенциальными.

Особенностью использования ТН в приточно-вытяжных установках является то, что источник низкопотенциальной энер-

гии (удаляемый воздух из помещения) имеет температуру, близкую к приточному воздуху. Расчетами подтверждается высокая эффективность использования теплового насоса в приточно-вытяжных установках, особенно при комбинации с различного вида утилизаторами теплоты [5, 6]. Это направление применения тепловых насосов сдерживается отсутствием методики расчета.

Реальный процесс изменения состояния хладагента в цикле теплового насоса значительно отличается от идеального. Обычно при построении процесса на $\lg p-h$ -диаграмме хладагента (p — давление хладагента, кПа; h — энтальпия хладагента, кДж/кг) не учитываются:

- приток теплоты и перегрев пара в линии всасывания;
- падение давления в линии всасывания;
- падение давления на всасывании компрессора;
- политропное сжатие с потерями теплоты в окружающую среду вместо изоэнтропического сжатия;
- падение давления на выпуске хладагента из компрессора;
- падение давления в линии нагнетания;
- потери теплоты и снижение перегрева пара в линии нагнетания;
- падение давления в конденсаторе;
- переохлаждение жидкости в конденсаторе;
- приток теплоты в жидкостной линии;
- падение давления в испарителе.

Реальный цикл может иметь некоторые или все из перечисленных причины отклонения от теоретического цикла, поэтому для разработки методики расчета необходимо располагать надежными данными о режимах совместной работы основных элементов ТН (испарителя, конденсатора и компрессора) и факторах, влияющих на его эффективность. Верификацию методики расчета можно выполнить только на основании результатов натурных измерений [15–18].

Основным показателем, характеризующим эффективность применения теплового насоса, является коэффициент преобразования энергии [19]:

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

где Q_T — теплопроизводительность (тепловой поток) цикла, Вт; N_k — мощность компрессора теплового насоса, Вт.

Коэффициент преобразования энергии называют также отопительным коэффициентом, тепловым коэффициентом, коэффициентом преобразования теплоты [18].

Создание эффективных в энергетическом отношении теплонасосных установок связано с применением рабочих веществ, отличающихся благоприятными физико-химическими и термодинамическими свойствами. В работе [20] отмечается, что оптимальным хладагентом для применения тепловых насосов в системах горячего водоснабжения является фреон R134a.

Эффективность применения теплового насоса зависит от температуры источника низкопотенциальной энергии, температур испарения и конденсации хладагента [1–20]. В настоящей работе поставлена цель определения зависимости фактических характеристик теплового насоса от указанных параметров для дальнейшей разработки и верификации методики расчета тепловых насосов в системах утилизации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха.

Методы

Исследование теплового насоса, работающего на хладагенте R134a, осуществлялось на экспериментальном стенде на базе лаборатории кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (рис. 1, 2).

Авторами на первом этапе исследований проведен расчетный анализ характеристик циклов теплового насоса с хладагентом R134a. Однако результаты такого анализа, полученные даже с использованием точно

рассчитанных термодинамических свойств хладагента, носят лишь ориентировочный характер, поэтому возникает необходимость получения характеристики действительных циклов на экспериментальном стенде.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Стенд размещен в отопляемом помещении и позволяет исследовать работу теплового насоса при температуре низкопотенциального источника от $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Стенд используется в режиме «вода-вода». Для испарителя теплового насоса ПТ1 низкопотенциальным источником является контур I, который получает теплоту от внутреннего воздуха помещения. С помощью конденсатора ПТ2 теплота передается высокопотенциальному источнику — контуру II. Потребителями теплоты в контуре II являются секционные биметаллические радиаторы и воздухонагреватель. В качестве теплообменников ПТ1 и ПТ2 теплового насоса приняты одноконтурные пластинчатые теплообменники фирмы Danfoss.

Для выполнения измерений температур и расходов теплоносителей в контурах I и II, а также температур хладагента стенд оснащен контрольно-измерительными приборами.

Результаты

Выполнено исследование зависимости коэффициента преобразования энергии от температуры низкопотенциального источника (теплоносителя на входе в испаритель, $t_{н.и}$, $^{\circ}\text{C}$) (рис. 3).

Мощность, потребляемая компрессором, N_k , Вт, при повышении температуры источника низкопотенциальной энергии снижается (рис. 4).

Зависимость коэффициента преобразования от разности температур конденсации и кипения хладагента при постоянной температуре кипения приведена на рис. 5. При этом тепловой поток низкопотенциального источника энергии остается постоянным, а возрастает энергопотребление компрессора (рис. 6).

Упрощенное изображение процесса изменения состояния хладагента для одного из измерений приведено на рис. 7:

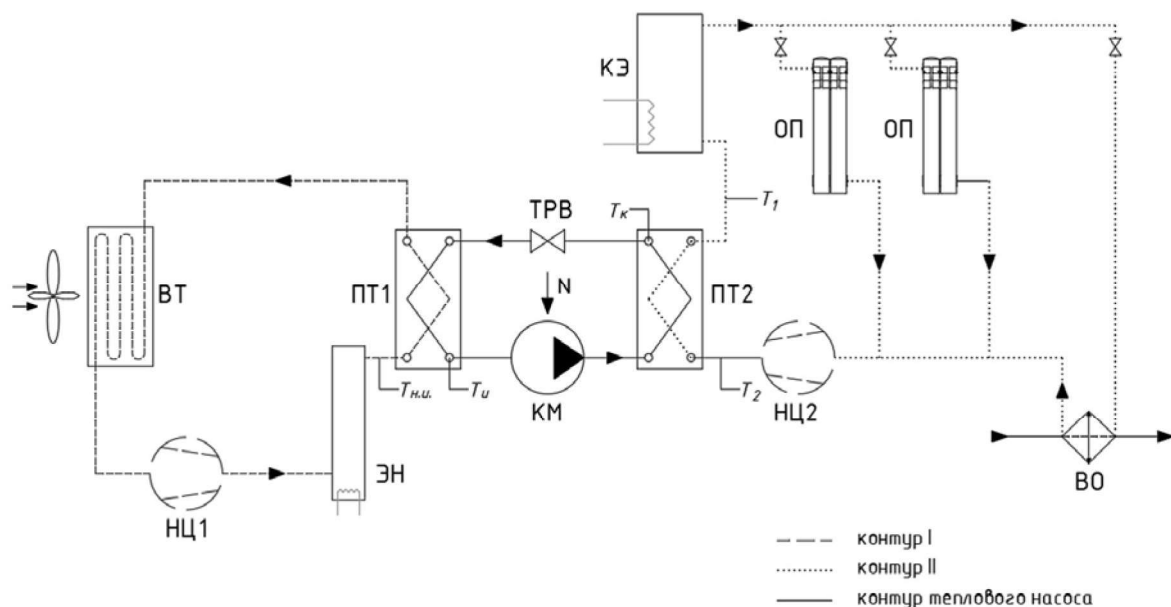


Рис. 1. Экспериментальный стенд: ВТ — воздушный теплообменник; ПТ1 — испаритель ТН; ПТ2 — конденсатор ТН; ВО — теплообменник «вода-воздух»; НЦ1 — циркуляционный насос контура I; НЦ2 — циркуляционный насос контура II; ЭН — электрический нагреватель; КЭ — котел электрический; КМ — компрессор ТН; ТРВ — терморегулирующий клапан; ОП — отопительный прибор



Рис. 2. Экспериментальный стенд

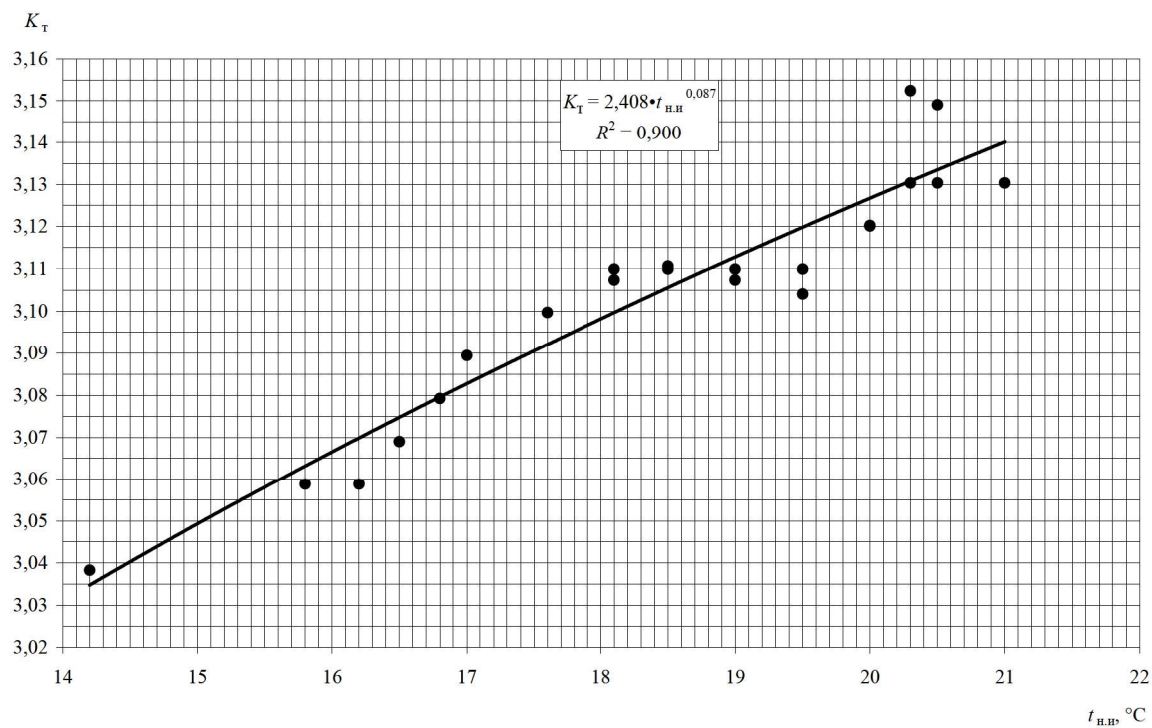


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования энергии от температуры теплоносителя на входе в испаритель теплового насоса при постоянной температуре конденсации хладагента ($t_k = 57,7^\circ\text{C}$)

- 1–2 — процесс политропного сжатия хладагента в компрессоре;
- 1–2' — процесс изоэнтропического сжатия хладагента в компрессоре;
- 2–3 — процессы в конденсаторе теплового насоса;
- 3–4 — процесс дросселирования;
- 4–1 — процессы кипения и перегрева хладагента.

Коэффициенты преобразования энергии:

- теоретический

$$K_{\tau}^{\text{т}} = \frac{h_{2'} - h_3}{h_{2'} - h_1} = \frac{435,9 - 283,8}{435,9 - 406,8} = 5,23;$$

- фактический

$$K_{\tau} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{466,6 - 283,8}{466,6 - 406,8} = 3,06.$$

Процесс политропного сжатия хладагента в компрессоре при таком построении учитывает все факторы, влияющие на отклонение реального процесса от идеального.

Обсуждение

Увеличение температуры теплоносителя в контуре I (источника низкопотенциальной энергии) при сохранении постоянной темпе-

ратуры конденсации и, как следствие, уменьшение разности температур конденсации и испарения приводят к увеличению коэффициента преобразования энергии. С увеличением температуры кипения растет давление рабочего тела в испарителе, что приводит к уменьшению степени сжатия в компрессоре и уменьшению затрачиваемой мощности на его приводе.

Степень сжатия хладагента в компрессоре определяется следующей зависимостью:

$$\varepsilon = p_{\text{к}} / p_{\text{и}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{к}}$ — давление конденсации хладагента, кПа; $p_{\text{и}}$ — давление испарения (кипения) хладагента, кПа.

Увеличение температуры теплоносителя в контуре II (охлаждающего конденсатор теплового насоса) при постоянной температуре кипения хладагента и, соответственно, разности температур конденсации и испарения приводит к снижению коэффициента преобразования энергии. В этом случае увеличиваются степень сжатия в компрессоре и потребляемая компрессором мощность.

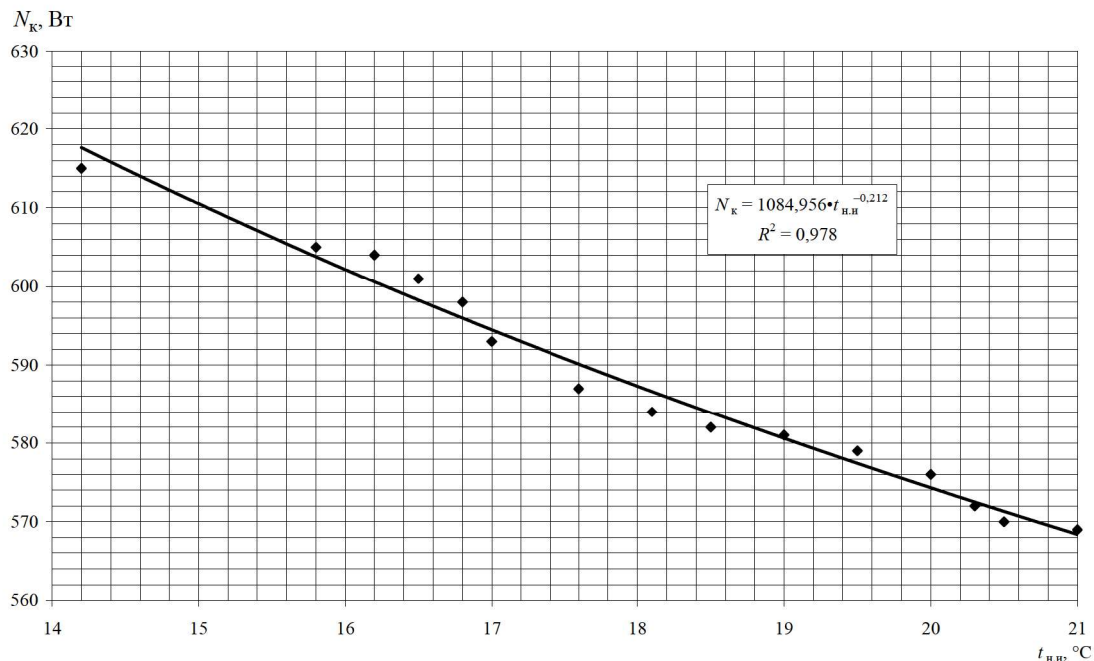


Рис. 4. Зависимость мощности, потребляемой компрессором, от температуры теплоносителя на входе в испаритель теплового насоса при постоянной температуре конденсации хладагента ($t_{\text{к}} = 57,7 ^\circ\text{C}$)

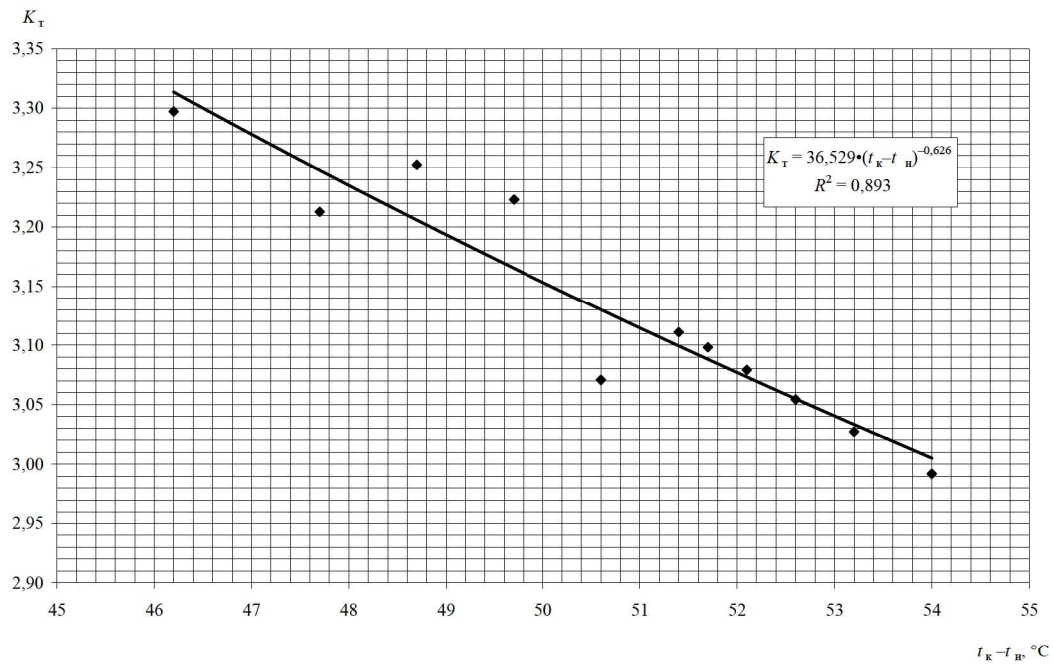


Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования энергии от разности температур конденсации и кипения хладагента при постоянной температуре кипения ($t_H = 5,7^{\circ}\text{C}$)

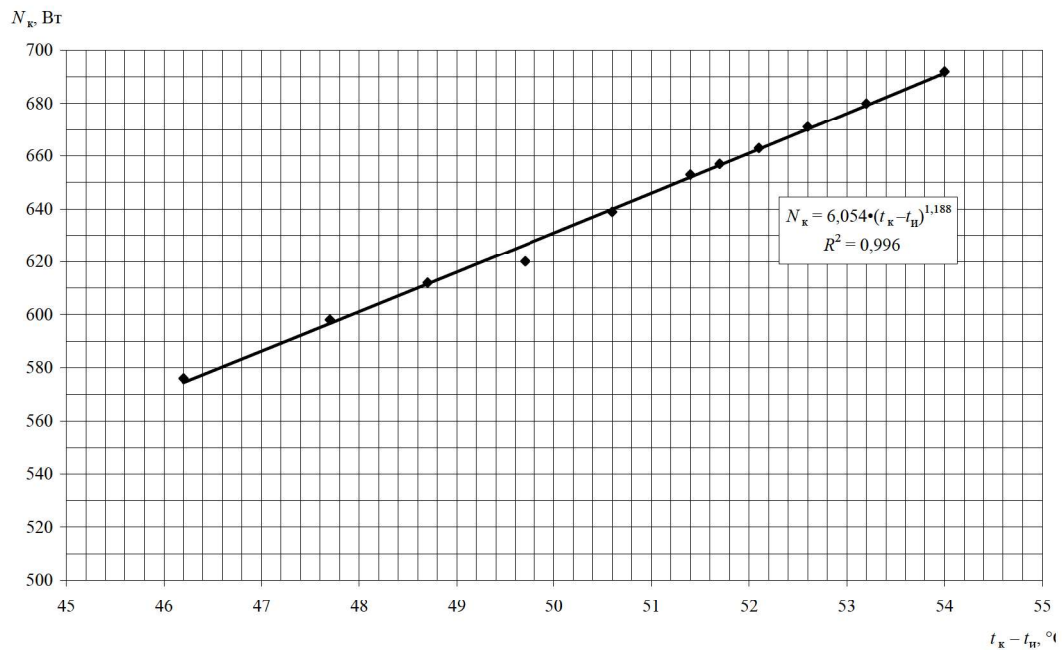


Рис. 6. Зависимость мощности, потребляемой компрессором, от разности температур конденсации и испарения хладагента при постоянной температуре кипения ($t_H = 5,7^{\circ}\text{C}$)

Эффективность работы теплового насоса определяется разностью температур конденсации и кипения хладагента и удалением цикла от критической точки.

Выводы

Проведенные исследования теплового насоса с хладагентом R134a в температурных границах циклов показали его работоспо-



Рис. 7. Изменение состояния хладагента в цикле одноступенчатого теплового насоса

способность и перспективность применения в системах вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения. Среднее значение коэффициента преобразования составило 3,1.

При исследовании получены зависимости:

- коэффициента преобразования энергии от температуры низкопотенциального источника при постоянной температуре конденсации хладагента;

- коэффициента преобразования энергии от разности температур конденсации и кипения хладагента при постоянной температуре кипения хладагента.

Одним из способов повышения эффективности теплового насоса является уменьшение степени сжатия хладагента в компрессоре.

Результаты испытаний теплового насоса «вода–вода» могут применяться для верификации расчетных моделей тепловых насосов, в том числе и других типов тепловых насосов.

Библиографический список

1. Аверьянов В. К., Уляшева В. М., Киборт И. Д. Анализ результатов моделирования одно- и двух-

контурного воздушного теплового насоса // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 164–167.

2. 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.

3. 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.

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

5. Пухкал В. А., Петров М. М. Утилизация теплоты в приточно-вытяжных установках с тепловым насосом // Эффективность инженерных систем и энергосбережение: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Брест, 19–20 октября 2023 г. / под ред. В. Г. Новосельцева [и др.]. Брест: Изд-во БрГТУ, 2023. С. 92–100.

6. Пухкал В. А., Петров М. М. Энергоэффективность приточно-вытяжных установок со встроенным тепловым насосом // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 1. С. 294–299.

7. 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 вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 278–281.

8. Волкова О. С., Пташкина-Гурина 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.

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

10. Яковлев И. В., Исхакова А. М., Парехина И. В. Энергоэффективность перехода на автономное теплоснабжение от воздушных теплонасосных установок в климатических условиях России // Вестник Московского энергетического ин-та. 2016. № 5. С. 105–112.

11. 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.

12. 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.

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

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

15. 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 1. Схемные решения и расчетная модель // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 3–10.

16. 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.

17. 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.

18. Гаранов С. А., Воронов В. А., Заболотный Д. Ю., Журлова П. Ю. Стенд парокомпрессионного теплового насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 1 (49). С. 1–11.

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

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

References

1. Aver'yanov V. K., Ulyasheva V. M., Kibort I. D. *Analiz rezul'tatov 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. Kibort I. D. *Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov modelirovaniya teploutilizatsionnogo teplovogo nasosa i klassicheskikh utilizatorov teplovoy 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.

3. Kibort I. D. *Analiz rezul'tatov modelirovaniya sootnosheniya osnovnykh pokazateley raboty teplonasosnoy sistemy utilizatsii teplovoy energii udalyaemogo vozdukha* [Analysis of the results of modeling the ratio of the main indicators of the operation of the heat pump system for the utilization of thermal energy of the removed air]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2016, no. 9–2, pp. 263–267.

4. Ulyasheva V. M., Kibort I. D. *Ob otsenke effektivnosti sistemy utilizatsii teplovoy 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 vuzov. Stroitel'stvo – Proceedings of Higher Schools. Construction*, 2016, no. 8 (692), pp. 53–58.

5. Pukhkal V. A., Petrov M. M. *Utilizatsiya teploty v pritochno-vytyazhnykh ustanovkakh s teplovym nasosom* [Heat utilization in plenum-exhaust plants with heat pump]. *Effektivnost' inzhenernykh sistem i energosberezhenie. Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Brest, 19–20 oktyabrya 2023 g.* [Efficiency of engineering systems and energy saving. Proceedings of the International. sci.-pract. conf., Brest, 19–20 October 2023]. Ed. by Novosel'tsev V. G., et al. Brest, BrGTU Publ., 2023, pp. 92–100.

6. Pukhkal V. A., Petrov M. M. *Energoeffektivnost' pritochno-vytyazhnykh ustanovok so vstroennym teplovym nasosom* [Energy efficiency of air handling plants with built-in heat pump]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' – Construction and Technogenic Safety*, 2023, no. 1, pp. 294–299.
7. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Aloyan S. M., Zaytseva I. A., Vinogradova N. V. *Vozmozhniy diapazon raboty vozdušnogo teplovogo nasosa v otopitel'nyy period* [Possible operating range of the air heat pump during the heating period]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Proceedings of Higher Schools. Textile Industry Technology*, 2017, no. 4 (370), pp. 278–281.
8. Volkova O. S., Ptashkina-Girina O. S., Mart'yanov A. S. *Vliyanie temperatury i vlazhnosti atmosfernogo vozdukh 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.
9. 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.
10. Yakovlev I. V., Iskhakova A. M., Parekhina I. V. *Energoeffektivnost' perekhoda na avtonomnoe teplosnabzhenie ot vozdukhnykh 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.
11. Chizhmakova V. Yu., Yakovlev I. V. *Primenenie teplonasosnykh ustanovok dlya utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukh 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.
12. Shungarov E. Kh., Protopopov K. V., Garanov S. A. *Kharakteristiki spiral'nykh kompressorov dlya primeneniya v nizkotemperaturnykh vozdukhnykh 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.
13. Protopopov K. V., Zhirebnyi I. P., Garanov S. A. *Sposoby regulirovaniya proizvoditel'nosti ustanovok konditsionirovaniya vozdukh s rezhimom teplovogo nasosa* [Methods for regulating the performance of air conditioning plants with a heat pump mode]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Schools. Mechanical Engineering*, 2014, no. 12 (657), pp. 76–83.
14. 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.
15. Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveynikov S. S., Nikitin A. A., Makatov K. *Energomodelirovanie i eksperimental'naya verifikatsiya rezhimov raboty teplovogo nasosa pri utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukh. Chast' 1. Skhemnye resheniya i raschetnaya model'* [Energy modeling and experimental verification of operating modes of a heat pump in the utilization of exhaust air heat. Part 1. Circuit solutions and design model]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda – Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2023, no. 4, pp. 3–10.
16. Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveynikov S. S., Nikitin A. A., Makatov K. *Energomodelirovanie i eksperimental'naya verifikatsiya rezhimov raboty teplovogo nasosa pri utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukh. Chast' 2. Energeticheskie, ekonomicheskie i ekologicheskie pokazateli* [Energy modeling and experimental verification of operating modes of a heat pump in the utilization of exhaust air heat. Part 2. Energy, economic and environmental performance]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda – Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2024, no. 1, pp. 43–49.
17. 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 Refrigeration*, 2022, no. 4, pp. 84–90.
18. Garanov S. A., Voronov V. A., Zabolotniy D. Yu., Zhurlova P. Yu. *Stend parokompressionnogo teplovogo nasosa* [Steam compression heat pump stand]. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 1 (49), pp. 1–11.
19. 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.
20. 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.