

УДК 621.311

DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-78-85

**КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ РАСЧЕТЕ
ИСПАРИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ПОПРАВКИ
НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГЛАЙД****А. В. ОВСЯННИК, Е. Н. МАКЕЕВА***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении зеотропного хладагента R407c, обладающего значительным температурным глайдом, в сравнении с хладагентами R404a, R410a, у которых температурный глайд незначителен. Процессы кипения исследовались в большом объеме при свободном движении жидкости на оребренных и капиллярно-пористых поверхностях. Получены расчетные формулы для определения интенсивности теплообмена при кипении исследованных жидкостей на теплоотдающих поверхностях в пределах заданных режимных параметров, в том числе с учетом температурного глайда. Для зеотропной смеси R407c в формулу для коэффициента теплоотдачи был введен понижающий поправочный коэффициент, учитывающий величину температурного глайда. Предварительные расчеты показали, что на 1 °C температурного глайда Δt_g снижение коэффициента теплоотдачи происходит примерно на 3 %. Таким образом, для хладагента R407c снижение коэффициента теплоотдачи составит примерно 20 %.

Ключевые слова: температурный глайд, коэффициент теплоотдачи, смесевые хладагенты, испаритель, критериальное уравнение, неизотермичность, температурное скольжение, зеотропный хладагент, озонобезопасный хладагент, теплообменный аппарат, теплообмен, расчет теплообменников, холодильная техника, температура кипения, испарение.

Для цитирования. Овсянник, А. В. Коэффициент теплоотдачи при расчете испарителей с учетом поправки на температурный глайд / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 78–85. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-78-85

**HEAT TRANSFER COEFFICIENT WHEN CALCULATING
EVAPORATORS TAKING INTO ACCOUNT
THE CORRECTION FOR TEMPERATURE GLIDE****A. V. OVSYANNIK, E. N. MAKEEVA***Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The article presents the results of experimental studies of heat transfer during boiling of the zeotropic refrigerant R407c, which has a significant temperature glide, in comparison with refrigerants R404a and R410a, which have an insignificant temperature glide. Boiling processes were studied in a large volume with free liquid movement on finned and capillary-porous surfaces. Calculation formulas were obtained for determining the intensity of heat transfer during boiling of the studied liquids on heat-transfer surfaces within specified operating parameters, including taking into account the temperature glide. For the zeotropic mixture R407c, a decreasing correction factor was introduced into the formula for the heat transfer coefficient, taking into account the magnitude of the temperature glide. Preliminary calculations showed that for every 1 °C of temperature glide Δt_g the heat transfer coefficient decreases by approximately 3 %. Thus, for the refrigerant R407c, the reduction in heat transfer coefficient will be approximately 20 %.

Keywords: temperature glide, heat transfer coefficient, mixed refrigerants, evaporator, criteria equation, non-isothermality, temperature glide, zeotropic refrigerant, ozone-safe refrigerant, heat exchanger, heat exchange, heat exchanger calculation, refrigeration equipment, boiling point, evaporation.

For citation. Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. Heat transfer coefficient when calculating evaporators taking into account the correction for temperature glide. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 78–85 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-78-85

Введение

При расчете и проектировании теплообменников, работающих на смесевых хладагентах, необходимы расчетные зависимости для определения интенсивности теплообмена при кипении, которые учитывали бы не только особенности процесса кипения, но и свойства кипящей жидкости. При кипении смесей происходит интенсивное выделение легкокипящего компонента и, соответственно, изменяется концентрация смеси, что приводит к изменению температурного напора стенка–жидкость. Также на процесс теплоотдачи существенное влияние оказывает температурное скольжение, или температурный глайд [1, 4].

Температурный глайд при кипении – это изменение значения температуры кипения при изменении фазового состояния хладагента. Это важная характеристика хладагента, определяющая его эксплуатационные свойства и конструкцию соответствующей холодильной техники. При их утечке из системы существенно изменяется соотношение состава в смеси, что изменяет все основные теплофизические и режимные характеристики хладагента (температура конденсации, температура кипения, давление конденсации, вязкость и т. д.) [2, 3]. Кроме того, величина температурного глайда приводит к заниженным размерам площади теплопередающей поверхности теплообменных аппаратов, что необходимо учитывать при расчете и выборе испарителей [4].

В испарителях холодильных машин необходимо поддерживать определенные условия, при которых не достигается точка росы, что исключает разложения хладагента на компоненты. Еще одной особенностью использования зеотропных хладагентов является необходимость впрыска смеси в систему только в жидком состоянии. Это требуется для исключения изменения состава вещества за счет его разделения на компоненты [2].

Целью настоящей работы является определение влияния температурного скольжения смесевых хладагентов на коэффициент теплоотдачи при расчете теплообменников испарительного типа.

Постановка задач

1. Проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на гладких, оребренных и капиллярно-пористых теплоотдающих поверхностях.

2. Исследовано влияние температурного глайда R407c на теплообмен при кипении.

3. Разработаны зависимости для расчета интенсивности теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов с учетом поправки на температурный глайд.

Известно, что зеотропные и азеотропные смеси в состоянии термодинамического равновесия ведут себя по-разному. Термодинамическое поведение смеси азеотропного состава подобно поведению чистого вещества, поскольку состав паровой и жидкой фаз у нее одинаков, а давления в точках росы и кипения одинаковы [6]. У зеотропных смесей концентрации паровой и жидкой фаз различаются, а изотерма под бинодалью в p - h координатах имеет наклон, т. е. кипение при постоянном давлении происходит при повышении температуры хладагента от точки t_{01} до t_{02} , а конденсация – при понижении температуры от t_{c1} до t_{c2} (рис. 1). Это обстоятельство необходимо учитывать при определении степени перегрева пара на входе в компрессор, а также при оценке энергетических характеристик холодильной установки [6, 7].

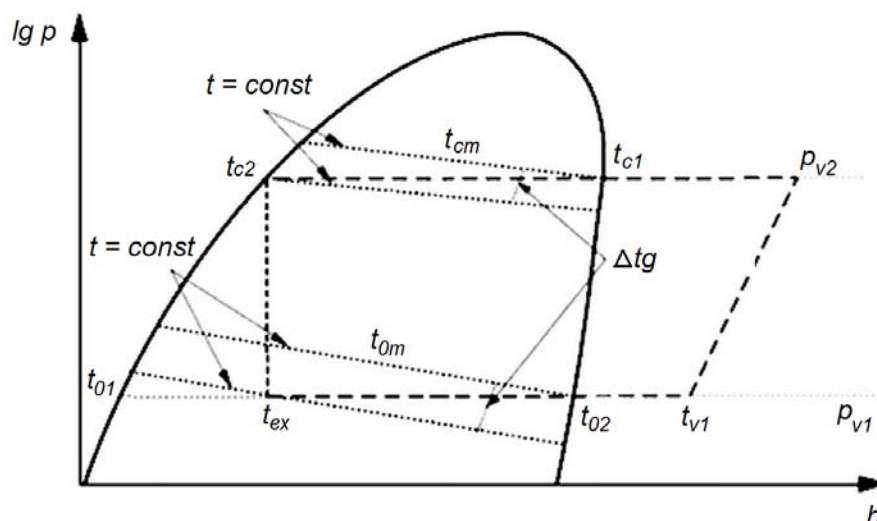


Рис. 1. Поведение зеотропных смесей при испарении и конденсации:
 t_{c1} – точка росы при конденсации при постоянном значении p_{v2} ; t_{c2} – точка кипения при конденсации при постоянном значении p_{v2} ; t_{02} – точка росы при испарении при постоянном значении p_{v1} ; t_{01} – точка кипения при испарении при постоянном значении p_{v1} ; p_{v1} – давление испарения; t_{ex} – температура после расширения; t_{cm} – средняя температура конденсации; t_{om} – средняя температура испарения; p_{v2} – давление конденсации; t_{v1} – температура всасывания газа при постоянном значении p_{v1} ; Δt_g – температурное скольжение

Величина значения Δt_g зависит от состава хладагента и является важным технологическим параметром [6].

Некоторые основные характеристики исследуемых хладагентов приведены в табл. 1 [8–11].

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых хладагентов

Хлад-агент	Состав	Молекулярная масса M , г/моль	Температура кипения t_0 , °C	Критическая температура t_k , °C	Критическое давление P_k , МПа	ODP/GWP
R404a	R125/R143a/R134a (52 %/44 %/4 %)	97,6	–46,5	72,1	3,73	0/3920
R407c	R32/R125/R134a (23 %/25 %/52 %)	86,2	–43,6	87,3	4,82	0/1370
R410a	R22/R125 (50 %/50 %)	72,59	–51,4	84,9	4,95	0/1890

Методика исследования

Экспериментальные исследования проводились на горизонтальных оребренных трубках и трубках с напеченным капиллярно-пористым покрытием при свободном движении рабочего тела в условиях большого объема при давлениях насыщения $p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа и плотностях теплового потока $q = 5\text{--}50$ кВт/м² [12, 13]. На рис. 2 представлена схема присоединения термопар к исследуемому образцу с оребрением. Спаи термопар в дюралюминиевый образец зачеканивались в четырех точках вдоль

поверхности на ребра и межреберную поверхность. Еще три термопары, используемые для измерения температур кипящей жидкости и образующихся паров, располагались в объеме жидкости и паровом пространстве.

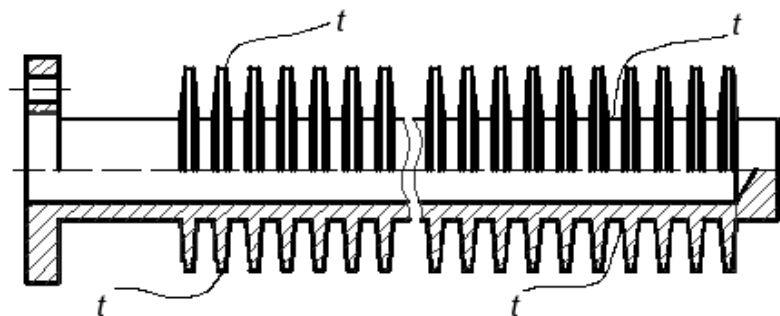


Рис. 2. Схема присоединения термопар на поперечно оребренной трубке с трапецевидальным профилем ребра

На рис. 3 представлена графическая зависимость температурного скольжения от температуры насыщения для исследуемых хладагентов R404a, R407c и R410a. Температура насыщения при этом изменялась от 0 до 15 °С.

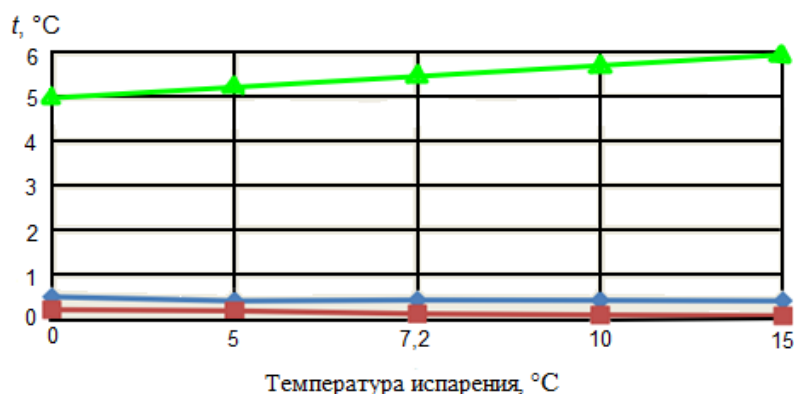


Рис. 3. Значение температурного скольжения в испарителе исследуемых хладагентов:
 — хладагент R404a; — хладагент R410a;
 — хладагент R407c

Графическая зависимость показывает, что с увеличением температуры насыщения величина температурного глайда у хладагентов R404a и R410a уменьшается, а у хладагента R407c увеличивается, что говорит о более тщательном контроле перегрева и переохлаждении этого хладагента [14].

Минимальный температурный глайд имеет хладагент R410a (0,15 К), максимальный — хладагент R407c (5–7 К). Эффект многокомпонентности сильнее сказывается на смесях с большим температурным глайдом, поэтому отклонения расчетных значений коэффициента теплоотдачи больше у смесей с большим температурным скольжением [14, 15].

Обработка результатов

Эмпирические уравнения подобия для теплоотдачи при кипении смесевых хладагентов, полученные на основе уравнения С. С. Кутателадзе, при $Re = 10^5 - 2 \cdot 10^7$, описывают интенсивность теплоотдачи при кипении исследованных хладагентов [12, 13].

Таблица 2

**Критериальные уравнения для определения теплоотдачи
при кипении смесевых хладагентов**

Поверхность теплообмена	Критериальное уравнение
Оребренная	$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{0,7} \cdot K_p^{0,7} \cdot Pr^{0,5}$
С капиллярно-пористым покрытием	$Nu = 45 \cdot K_{пор}^{0,7} \cdot K^{0,9} Pr^{0,6}$

Необходимо отметить, что полученные уравнения применимы к азеотропным хладагентам R404a и R410a, так как состав их паровой и жидкой фаз одинаков, а давления в точках росы и кипения совпадают. Для зеотропной смеси R407c концентрации паровой и жидкой фаз в условиях термодинамического равновесия различаются. В связи с этим в формулу необходимо ввести поправку на коэффициент теплоотдачи для хладагента R407c, который обладает значительным температурным глайдом [16–19].

Действительное значение температуры насыщения невозможно определить экспериментально. Поэтому определялась температура сухого насыщенного пара над жидкостью. Таким образом, температура кипения R407c t_0 (точка азеотропы) определялась как средняя между температурой сухого насыщенного пара t_{02} при постоянном давлении p_{v1} и температурой жидкого хладагента, при которой он поступает в испаритель t_{01} :

$$t_0 = \frac{t_{01} + t_{02}}{2}. \quad (1)$$

Предварительные расчеты показали, что на 1 °C температурного глайда Δt_g снижение коэффициента теплоотдачи происходит на $\approx 3 \%$, следовательно, для хладагента R407c снижение коэффициента теплоотдачи составит $\approx 20 \%$. Таким образом, критериальные уравнения для определения интенсивности теплоотдачи при кипении зеотропного хладагента R407c на оребренных и капиллярно-пористых поверхностях с учетом температурного глайда будут:

$$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \cdot k_{гл} \cdot Re^{0,7} \cdot K_p^{0,7} \cdot Pr^{0,5}; \quad (2)$$

$$Nu = 45 \cdot k_{гл} \cdot K_{пор}^{0,7} \cdot K^{0,9} Pr^{0,6}, \quad (3)$$

где $k_{гл} = 1 - 0,03\Delta t_g$ – поправка на температурный глайд (для хладагента R407c $k_{гл} = 0,8$).

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Применение в холодильных установках в качестве хладагентов зеотропных смесей приводит к повышению холодопроизводительности и холодильного коэффициента и к снижению коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента в испарителе.

2. Экспериментально получена величина снижения интенсивности теплоотдачи на 1 °C температурного глайда, составляющая $\approx 3 \%$ значения коэффициента теплоотдачи.

Литература

1. Мезенцева, Н. Н. Кипение однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей внутри горизонтальных гладких труб / Н. Н. Мезенцева, В. А. Мухин, И. В. Мезенцев // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2013. – № 1 (12). – С. 251–254. – URL: <https://www.triacon.org/modern.science/ru/issues/2013/files/papers/1/251-254.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
2. Макеева, Е. Н. Влияние температурного глайда смесевых хладагентов на работу холодильной системы / Е. Н. Макеева, С. А. Радощ // Еколого-енергетичні проблеми сучасності : сб. науч. тр. всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. – Одесса : ОНАХТ, 2016. – С. 198–201. – URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/4eb17edb-591d-48bf-960a-1dc38e2ce073> (дата обращения: 05.09.2025).
3. High-Glide Refrigerant Blends In High-Temperature Heat Pumps: Part 1 – Coefficient Of Performance / L. P. M. Brendel, S. N. Bernal, Ph. Widmaier [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2024. – Т. 165. – С. 84–96.
4. Овсяник, А. В. Поправка на температурный глайд смесевых озонобезопасных хладагентов при расчете испарителей холодильных и теплонасосных установок / А. В. Овсяник, Е. Н. Макеева // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы : сб. докл. III Междунар. науч. конф. – Минск, 2025. – С. 634–639.
5. Букин, В. Г. Интенсивность теплообмена при кипении R407c с маслом в судовых системах кондиционирования воздуха / В. Г. Букин, В. М. Цалоев // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-4 (42). – С. 76–79.
6. Бабакин, Б. С. Хладагенты, масла, сервис холодильных систем / Б. С. Бабакин. – Рязань : Узорочье, 2003. – 470 с.
7. Хладагенты и хладоносители систем кондиционирования воздуха / А. А. Никитин, Т. В. Рябова, А. В. Василенок, В. А. Павловская // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2015. – № 3. – С. 7–12. – URL: <https://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/13776.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
8. Свойства и нюансы использования хладагентов. Ч. 2 // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2015. – № 12 (168). – С. 78–87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27443270> (дата обращения: 05.09.2025).
9. Beyond Temperature Glide: The Compressor Is Key To Realizing Benefits Of Zeotropic Mixtures In Heat Pumps / D. Roskosch, V. Venzik, J. Schilling [et al.] // Energy Technology. – 2021. – Vol. 9, № 4. – P. 2000955. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.202000955> (дата обращения: 05.09.2025).
10. Experimental Investigation Of A Heat Pump Tumble Dryer With A Zeotropic Refrigerant Mixture / M. Cop, R. B. Barta, Ch. Thomas, U. Hesse // International Journal of Refrigeration. – 2024. – Vol. 158. – P. 190–201. – URL: <https://docs.lib.purdue.edu/mepubs/61/> (дата обращения: 05.09.2025).
11. Zeotropic Mixtures R1234ze(Z)/Acetone And R1234ze(Z)/Isohexane As Refrigerants In High Temperature Heat Pumps: Influence Of The Accuracy In Thermodynamic Properties Evaluations / H. Abedini, S. Tomassetti, G. Di Nicola [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2023. – Vol. 152. – P. 93–109. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700723001330> (дата обращения: 05.09.2025).
12. Макеева, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на обогреваемых теплоотдающих поверхностях / Е. Н. Макеева // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 72–78.
13. Овсяник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсяник, Е. Н. Макеева // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 1. – С. 70–79. – URL: https://energy.bntu.by/jour/article/view/1146?locale=ru_RU (дата обращения: 05.09.2025).

14. Деменев, А. В. Оценка показателей качества холодильных агентов, используя инфографическое моделирование / А. В. Деменев, А. И. Данилов // Наукоедение. – 2013. – № 1 (14). – С. 1–15. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19009335> (дата обращения: 05.09.2025).
15. Гогонин, И. И. Теплообмен при кипении бинарных смесей в условиях свободной конвекции / И. И. Гогонин // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 646–651. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teploobmen-pri-kipenii-v-usloviyah-plenochного-techeniya-binar-noy-smesi-hladonov-po-poverhnosti-s-mikrostrukturoy> (дата обращения: 05.09.2025).
16. Должиков, А. С. Процессы кипения и конденсации многокомпонентных рабочих тел в микротеплообменниках / А. С. Должиков, В. И. Могорычный // Успехи прикладной физики. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 103–112. – URL: <https://advance.orion-ir.ru/UPF-17/2/UPF-5-2-103.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
17. Мезенцева, Н. Н. Исследование теплофизических процессов в парокompрессионных тепловых насосах, работающих на неазеотропных хладагентах : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Мезенцева Надежда Николаевна. – Новосибирск, 2016. – 137 с. – URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-teplofizicheskikh-protsessov-v-parokompresionnykh-teplovyykh-nasosakh-rabotayus> (дата обращения: 05.09.2025).
18. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 263–275. – URL: https://energy.bntu.by/jour/article/view/2166/1829?locale=ru_RU (дата обращения: 05.09.2025).
19. Evaporation of refrigerant r134a, r404a and r407c with low mass flux in smooth vertical tube / P. Horák, M. Formánek, T. Fečér, J. Plášek // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 181. – P. 121845.

References

1. Mezentseva N. N., Mukhin V. A., Mezentsev I. V. Boiling of single-component refrigerants and non-azeotropic mixtures inside horizontal smooth pipes. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, 2013, no. 1 (12), pp. 251–254. Available at: <https://www.triacon.org/modern.science/ru/issues/2013/files/papers/1/251-254.pdf> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
2. Makeeva E. N., Radosh S. A. Effect of temperature glide of mixed refrigerants on the operation of the refrigeration system. *Ekologo-energetichni problemi suchasnosti: sb. nauch. tr. vseukr. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i studentov* [Collection of scientific papers of the All-Ukrainian scientific and technical conf. of young scientists and students "Ecological and energy problems of the present"]. Odessa, ONAKhT Publishing House, 2016, pp. 198–201. Available at: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/4eb17edb-591d-48bf-960a-1dc38e2ce073> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
3. Brendel L. P. M., Bernal S. N., Widmaier Ph., Roskosch D., Arpagaus C., Bardow A., Bertsch S. S. High-Glide Refrigerant Blends In High-Temperature Heat Pumps: Part 1 – Coefficient Of Performance. *International Journal of Refrigeration*, 2024, vol. 165, pp. 84–96.
4. Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. Correction for the temperature glide of mixed ozone-safe refrigerants in the calculation of evaporators of refrigeration and heat pump units. *Ustoichivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus': sostoyanie i perspektivy: sb. dokl. III Mezhdunar. nauch. konf.* [Sustainable Development of Energy in the Republic of Belarus: Status and Prospects. Collection of papers of the III International Scientific Conference]. Minsk, 2025, pp. 634–639 (in Russian).
5. Bukin V. G., Tsaloiev V. M. Heat exchange intensity during boiling of R407c with oil in ship air conditioning systems. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine intellectual technologies*, 2018, no. 4-4 (42), pp. 76–79 (in Russian).
6. Babakin B. S. *Refrigerants, oils, service of refrigeration systems*. Ryazan': Uzoroch'e Publishing, 2003. 470 p. (in Russian).

7. Nikitin A. A., Ryabova T. V., Vasilenok A. V., Pavlovskaya V. A. Refrigerants and coolants of air conditioning systems. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie* = Scientific journal of NRU ITMO. Series: Refrigeration engineering and air conditioning, 2015, no. 3, pp. 7–12. Available at: <https://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/13776.pdf> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
8. Properties and nuances of using refrigerants. Part 2. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2015, no. 12 (168), pp. 78–87. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27443270> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
9. Roskosch D., Venzik V., Schilling J., Bardow A., Atakan B. Beyond Temperature Glide: The Compressor Is Key To Realizing Benefits Of Zeotropic Mixtures In Heat Pumps. *Energy Technology*, 2021, vol. 9, no. 4, art. 2000955. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.202000955> (accessed 05 September 2025).
10. Cop M., Barta R. B., Thomas Ch., Hesse U. Experimental Investigation Of A Heat Pump Tumble Dryer With A Zeotropic Refrigerant Mixture. *International Journal of Refrigeration*, 2024, vol. 158, pp. 190–201. Available at: <https://docs.lib.purdue.edu/mepubs/61/> (accessed 05 September 2025).
11. Abedini H., Tomassetti S., Di Nicola G., Quoilin S., Arteconi A. Zeotropic Mixtures R1234ze(Z)/Acetone And R1234ze(Z)/Isohexane As Refrigerants In High Temperature Heat Pumps: Influence Of The Accuracy In Thermodynamic Properties Evaluations. *International Journal of Refrigeration*, 2023, vol. 152, pp. 93–109. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700723001330> (accessed 05 September 2025).
12. Makeeva E. N. Heat transfer during boiling of mixed ozone-safe refrigerants on finned heat-transfer surfaces. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2015, no. 3, pp. 72–78 (in Russian).
13. Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. Determination of heat transfer parameters during vaporization of mixed refrigerants on highly thermally conductive powder sintered capillary-porous coatings. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 70–79. Available at: https://energy.bntu.by/jour/article/view/1146?locale=ru_RU (accessed 05 September 2025) (in Russian).
14. Demenev A. V., Danilov A. I. Evaluation of quality indicators of refrigerants using infographic modeling. *Naukovedenie*, 2013, no. 1 (14), pp. 1–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19009335> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
15. Gogonin I. I. Heat transfer during boiling of binary mixtures and free convection conditions. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2013, vol. 86, no. 3, pp. 646–651. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/teploobmen-pri-kipenii-v-usloviyah-plenochnogo-techeniya-binarnoy-smesi-hladonov-poverhnosti-s-mikrostrukturoy> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
16. Dolzhikov A. S., Mogorychnyi V. I. Boiling and condensation processes of multicomponent working fluids in micro heat exchangers. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 103–112. Available at: <https://advance.orion-ir.ru/UPF-17/2/UPF-5-2-103.pdf> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
17. Mezentseva N. N. *Study of thermophysical processes in vapor-compression heat pumps operating on non-azeotropic refrigerants* [dissertation]. Novosibirsk, 2016. 137 p. Available at: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-teplofizicheskikh-protsessov-v-parokompressionnykh-teplovykh-nasosakh-rabotayus> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
18. Ovsyannik A. B., Klyuchinskii V. P. Trigenation turbo plants based on low-boiling working fluids. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2022, vol. 65, no. 3, pp. 263–275. Available at: https://energy.bntu.by/jour/article/view/2166/1829?locale=ru_RU (accessed 05 September 2025) (in Russian).
19. Horák P., Formánek M., Fečér T., Plášek J. Evaporation of refrigerant r134a, r404a and r407c with low mass flux in smooth vertical tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 181, art. 121845.