

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 гайдом, в сравнении с хладагентами R404a, R410a, у которых температурный гайд 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 гайды. Для зеотропной смеси R407c в формулу для коэффициента теплоотдачи был введен понижающий поправочный коэффициент, учитывающий величину температурного гайды. Предварительные расчеты показали, что на 1 °C температурного гайды  $\Delta t_g$  снижение коэффициента теплоотдачи происходит примерно на 3 %. Таким образом, для хладагента R407c снижение коэффициента теплоотдачи составляет примерно 20 %.*

**Ключевые слова:** температурный гайд, 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 гайд / 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  $\Delta t_g$ , 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 гайд [1, 4].

Температурный гайд 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 гайда 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 разложение 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.

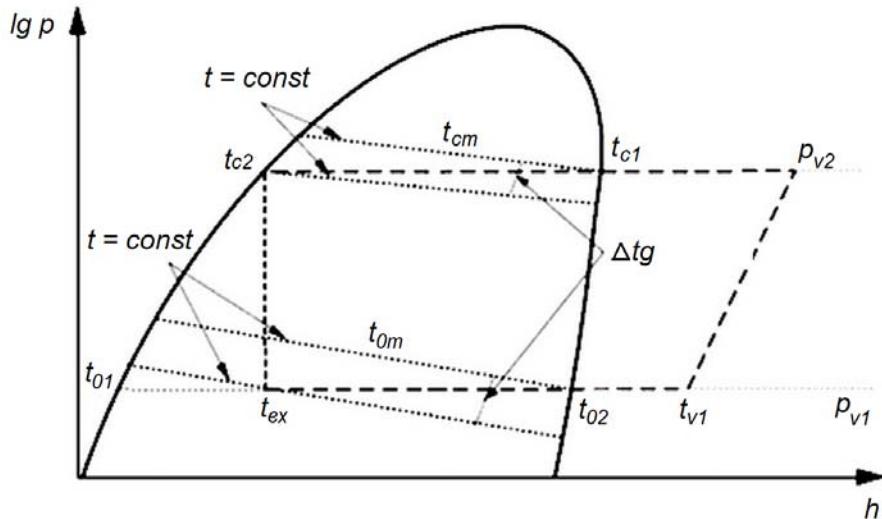
## Постановка задач

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

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

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

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;  $t_{\text{вх}}$  – температура после расширения;  $t_{\text{ср}}$  – средняя температура конденсации;  $t_{\text{от}}$  – средняя температура испарения;  $p_{v2}$  – давление конденсации;  $t_{v1}$  – температура всасывания газа при постоянном значении  $p_{v1}$ ;  $\Delta t_g$  – температурное скольжение

Величина значения  $\Delta t_g$  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 напиченным 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/м<sup>2</sup> [12, 13]. На рис. 2 представлена схема присоединения термопар к исследуемому образцу с оребрением. Спай 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.

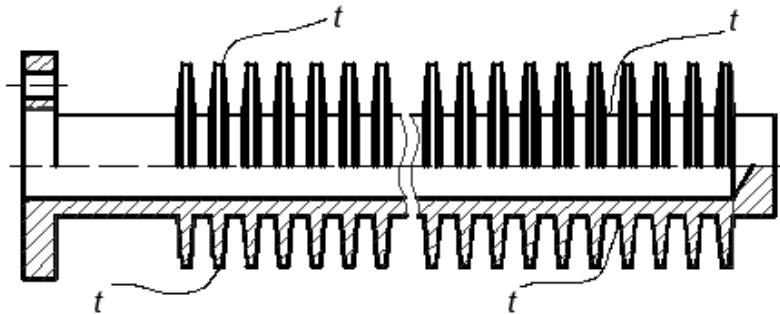


Рис. 2. Схема присоединения термопар на поперечно оребренной трубке с трапециoidalным профилем ребра

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 °C.

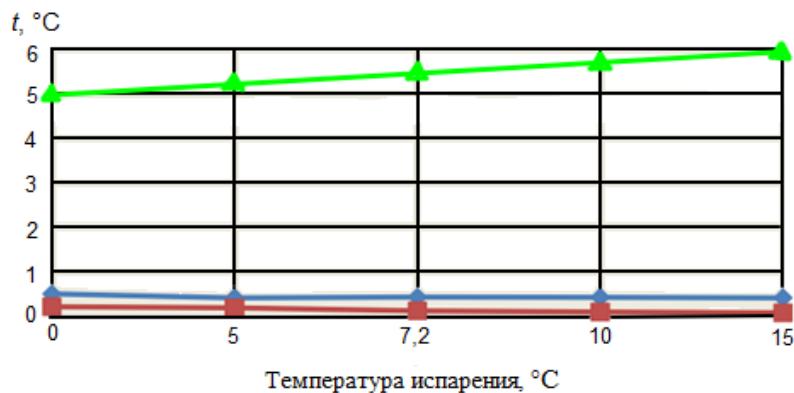


Рис. 3. Значение температурного скольжения в испарителе исследуемых хладагентов:  
 — хладагент R404a; ■ — хладагент R410a;  
 ▲ — хладагент R407c

Графическая зависимость показывает, что с увеличением температуры насыщения величина температурного гляйда 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 гляйд имеет хладагент R410a (0,15 K), максимальный – хладагент R407c (5–7 K). Эффект многокомпонентности сильнее сказывается на смесях с большим температурным гляйдом, 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	$Nu = 45 \cdot K_{\text{поп}}^{0,7} \cdot K^{0,9} \Pr^{0,6}$

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 гайдом [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 гайда  $\Delta t_g$  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 гайда будут:

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

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

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

### 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 гайда, составляющая  $\approx 3\%$  значения коэффициента теплоотдачи.

## Литература

1. Мезенцева, Н. Н. Кипение однокомпонентных хладагентов и неазеатропных 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 гляйда смесевых хладагентов на работу холодильной системы / Е. Н. Макеева, С. А. Радош // Еколо-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 гляйд смесевых озонобезопасных хладагентов при расчете испарителей холодильных и теплонасосных установок / А. В. Овсянник, 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 обработанных 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](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 // Науковедение. – 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-plenochnogo-techeniya-binarnoy-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 парокомпрессионных тепловых насосах, работающих на неazeotropicих хладагентах : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Мезенцева Надежда Николаевна. – Новосибирск, 2016. – 137 с. – URL: <https://www.dissertcat.com/content/issledovanie-teplofizicheskikh-protsessov-v-parokompressionnykh-teplovyykh-nasosakh-rabotayus> (дата обращения: 05.09.2025).
18. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих 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](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. Fečer, J. Plášek // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 181. – Р. 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 razvitiye 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., Tsaloev 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 konditsionirovaniye* = 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, konditsionirovaniye*, 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.psu.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](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-po-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.dissertcat.com/content/issledovanie-teplofizicheskikh-protsessov-v-parokompressionsnykh-teplovykh-nasosakh-rabotayus> (accessed 05 September 2025) (in Russian).
18. Ovsyannik A. B., Klyuchinskii V. P. Trigeneration 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](https://energy.bntu.by/jour/article/view/2166/1829?locale=ru_RU) (accessed 05 September 2025) (in Russian).
19. Horák P., Formánek M., Fečer 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.