

12. V Finlyandii nachali promyshlennyj vypusk bionefti // Greenevolution [Electronic resource]. – Mode of access: <http://greenevolution.ru/2015/05/14/v-finlyandii-nachali-promyshlennyj-vypusk-bionefti>. – Date of access: 05.12.2017.

13. Primenenie bionefti // Yumpu [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/6222617>. – Date of access: 05.12.2017.

14. Geletuha G. G. Obzor sovremennyh tekhnologij polucheniya zhidkogo topliva iz biomassy byстрыm pirolizom. CH. 1 / G. G. Geletuha, T. A. Zheleznaya // Ekotekhnologii i resurso-sberezhenie. – 2000. – № 2. – С. 3–10.

15. Ingemar Olofsson, Anders Nordin and Ulf Soderlind Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels // ISSN 1653-0551 ETPC Report 05.

УДК 621.311

**А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева**

**ПОПРАВКА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГЛАЙД  
СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ  
ПРИ РАСЧЕТЕ ИСПАРИТЕЛЕЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ  
И ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Гомель,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** В данной работе представлены зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи с учетом поправки на температурный глайд на основе впервые проведенных экспериментальных исследований теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхностях с наружным поперечным оребрением с различным профилем ребра и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием.

**Ключевые слова:** теплообмен, температурный глайд, коэффициент теплоотдачи, смесевые хладагенты, испаритель, критериальное уравнение.

**A. V. Ovsyannik, E. N. Makeeva**

**CORRECTION FOR TEMPERATURE GLIDE  
OF MIXED OZONE-SAFE REFRIGERANTS  
WHEN CALCULATING EVAPORATORS  
OF REFRIGERATION AND HEAT PUMP UNITS**

*Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus*

**Annotation.** This paper presents dependencies for calculating the heat transfer coefficient, taking into account correction for temperature glide, based on the first experimental studies of heat transfer during boiling of mixed ozone-friendly refrigerants R404a, R407c and R410a on surfaces with external transverse fins with different fin profiles and with a highly thermally conductive sintered capillary-porous coating.

**Keywords:** heat exchange, temperature glide, heat transfer coefficient, mixed refrigerants, evaporator, criterion equation.

**Введение.** В молекулярной теории растворов различают зеотропные и азеотропные смеси. 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 совпадают. Разность температур фазового перехода при постоянном давлении (при кипении или конденсации) получила название  $\Delta t_g$  или температурный глайд (от англ. *glide* – скольжение). Значение  $\Delta t_g$  зависит от состава рабочего тела и является важным технологическим параметром [1].

Температурный глайд в холодильной и климатической технике – это характеристика хладагента, определяющая его эксплуатационные свойства и конструкцию соответствующей холодильной техники. Азеотропные хладагенты обладают малым значением глайда. Их использование в холодильной и климатической технике является предпочтительным. Зеотропные хладагенты, как правило, состоят из смеси веществ. При их утечке из холодильной или климатической системы существенно изменяется соотношение состава в смеси, при этом изменяются все основные характеристики хладагента, такие как температура конденсации, температура кипения, давление конденсации, вязкость и т. д. [1–3, 7].

При проектировании и расчете теплообменных аппаратов, работающих на смесевых хладагентах, необходимы уравнения для определения коэффициента теплоотдачи при кипении, учитывающие особенности процесса. При кипении смесей происходит интенсивное выделение легкокипящего компонента и, соответственно, меняется концентрация смеси, которая приводит к изменению температурного напора стенка-жидкость [4]. Также на процесс теплоотдачи оказывает значительное влияние неизотермичность фазового перехода, или температурный глайд. Для однокомпонентных веществ предложено значительное число соотношений, но лишь немногие уравнения пригодны для смесей хладагентов. Применимость этих общих соотношений для смесевых хладагентов должна быть доказана [5, 6].

**Материалы и методы исследования.** Для проведения экспериментальных исследований по кипению озонобезопасных хладагентов в теплообменных аппаратах испарительного типа были использованы следующие хладагенты: R404a ( $\Delta t_g = 0,5$  K), R407c ( $\Delta t_g = 5-7$  K), R410a ( $\Delta t_g = 0,15$  K) (рис. 1) [8].

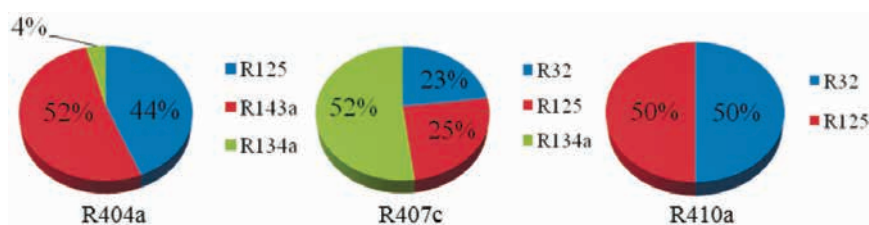


Рис. 1. Состав хладагентов

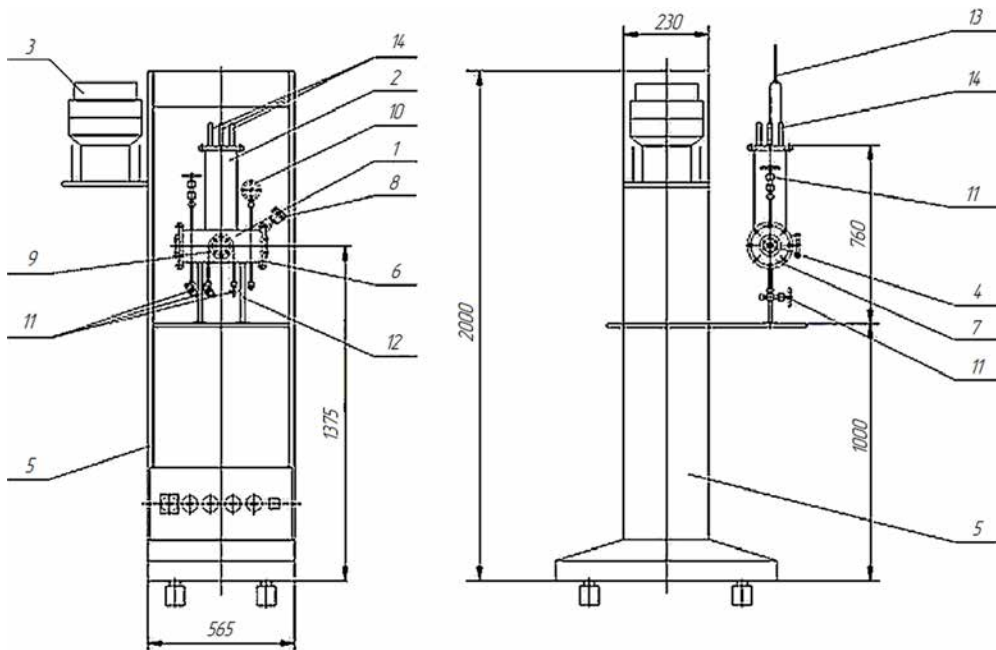


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования процесса парообразования в испарителях: 1 – рабочая испарительная камера; 2 – водяной теплообменник-конденсатор; 3 – баллон с жидким фреоном; 4, 9 – окно для визуального наблюдения; 5 – стойка; 6, 7 – фланцы; 8 – вывод термопар; 10 – манометр; 11 – вентиль; 12 – опора рабочей камеры; 13, 14 – вход и выход охлаждающей жидкости

Экспериментальные исследования проводились на стенде, который представляет собой рабочую камеру, сверху к которой по центру присоединен теплообменник-конденсатор, представляющий собой цилиндр диаметром 107 мм, и длиной 285 мм (рис. 2).

В торцевой стенке конденсатора предусмотрена возможность установки стекла с крышкой для визуального наблюдения за процессами конденсации. Ось конденсатора расположена вертикально. Наблюдения за процессами парообразования производились через боковое и торцевое смотровые окна. Рабочая камера полностью заполнялась рабочей жидкостью вплоть до внутренней линии разъема с теплообменником-конденсатором. Необходимое давление в камере создавалось и поддерживалось с помощью регулировки нагрузки, подаваемой на нагреватель, устанавливаемый внутри образца, и изменением расхода охлаждающей воды через два змеевика конденсатора. Контроль давления осуществлялся с помощью манометра, установленного на рабочей камере, и одной термопары, расположенной в паровом пространстве. Экспериментальный образец устанавливался с по-

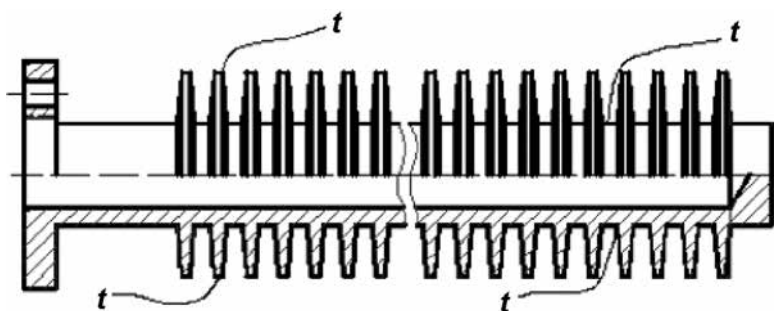


Рис. 3. Схема присоединения термопар на поперечно-оребренной трубке с трапециевидальным профилем ребра

мощью фланцевого соединения. Тепловой поток к образцу подводился электрическим нагревателем [6].

Эксперименты проводились на горизонтальных оребренных трубках с различной геометрией ребра и капиллярно-пористым покрытием в условиях свободного движения рабочего тела при давлениях насыщения  $p_n = 0,9-1,4$  МПа, при плотностях теплового потока  $q = 5-50$  кВт/м<sup>2</sup>. На рис. 3 представлена схема присоединения термопар к исследуемому образцу. 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 [9].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Эмпирические уравнения подобия для теплоотдачи при кипении смесевых хладагентов были получены на основе уравнения С. С. Кутателадзе [6, 9]. Стоит отметить, что данные уравнения имеют место для азеотропных хладагентов R404a и R410a, поскольку состав паровой и жидкой фаз у них 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 формулы была введена поправка на коэффициент теплоотдачи для хладагента R407c, обладающего значительным температурным глайдом (таблица).

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

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

Предварительные расчеты показали, что на 1 °С температурного глайда  $\Delta t_g$  снижение коэффициента теплоотдачи происходит на  $\approx 3\%$ , таким образом для хладагента R407c снижение коэффициента теплоотдачи составит  $\approx 20\%$ .

Следовательно, поправка на температурный глайд:  $k_{гг} = 1 - 0,03 \cdot \Delta t_g$  (для хладагента R407c  $k_{гг} = 0,8$ ).

**Заключение.** Таким образом, с одной стороны, изменение состава зеотропной смеси при циркуляции ее по контуру холодильной системы может привести к возрастанию холодопроизводительности и холодильного коэффициента по сравнению с этими характеристиками для чистых хладагентов. С другой стороны, применение зеотропных смесей может привести к снижению интенсивности теплообмена в испарителе и конденсаторе. Существующие соотношения для оценки коэффициента теплоотдачи неприменимы для зеотропных смесей, поэтому необходимо учитывать поправку на температурный глайд.

### Список использованных источников

1. Бабакин, Б. С. Хладагенты, масла, сервис холодильных систем / Б. С. Бабакин. – Рязань : Узорчье, 2003. – 470 с.
2. 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.
3. Гогонин, И. И. Теплообмен при кипении бинарных смесей и условиях свободной конвекции / И. И. Гогонин // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 646–651.
4. 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.
5. Макеева, Е. Н. Влияние температурного глайда смесевых хладагентов на работу холодильной системы / Е. Н. Макеева, С. А. Радош // Эколого-энергетические проблемы современности : XVI Всеукр. науч.-тех. конф. молодых ученых и студентов, Одесса, 14 апр. 2016 г. : сб. науч. тр. – Одесса : ОНАХТ, 2016. – С. 198–201.
6. Макеева, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных теплоотдающих поверхностях / Е. Н. Макеева // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 72–78.
7. Мезенцева, Н. Н. Кипение однокомпонентных хладагентов и неazeотропных 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.
8. Хладагенты и хладоносители систем кондиционирования воздуха / А. А. Никитин [и др.] // Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. – 2015. – № 3. – С. 7–12.
9. Овсянник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 1. – С. 70–79.

## References

1. Babakin, B. S. Hladagenty, masla, servis holodil'nyh sistem / B. S. Babakin. – Ryazan' : Uzoroch'e, 2003. – 470 s.
2. Bukin, V. G. Intensivnost' teploobmena pri kipenii R407s s maslom v sudovyh sistemah kondicionirovaniya vozduha / V. G. Bukin, V. M. Caloev // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2018. – № 4-4 (42). – S. 76–79.
3. Gogonin, I. I. Teploobmen pri kipenii binarnykh smesey i usloviyakh svobodnoj konvekcii / I. I. Gogonin // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2013. – T. 86, № 3. – S. 646–651.
4. Dolzhikov, A. S. Processy kipeniya i kondensacii mnogokomponentnykh rabochih tel v mikroteploobmennikah / A. S. Dolzhikov, V. I. Mogorychnyj // Uspekhi prikladnoj fiziki. – 2017. – T. 5, № 2 – S. 103–112.
5. Makeeva, E. N. Vliyaniye temperaturnogo glajda smesevykh hladagentov na rabotu holodil'noj sistemy / E. N. Makeeva, S. A. Radosh // Ekologo-energeticheskie problemy sovremenosti : XVI Vseukr. nauch.-tekh. konf. molodykh uchenykh i studentov, Odessa, 14 apr. 2016 g. : sb. nauch. tr. – Odessa : ONAHT, 2016. – S. 198–201.
6. Makeeva, E. N. Teploobmen pri kipenii smesevykh ozonobezopasnykh hladagentov na orebrennykh teplootdayushchih poverhnostyakh / E. N. Makeeva // Vestn. GGTU im. P. O. Suhogo. – 2015. – № 3. – S. 72–78.
7. Mezenceva, N. N. Kipenie odnokomponentnykh hladagentov i neazeotropnykh smesey vnutri gorizontalnykh gladkih trub / N. N. Mezenceva, V. A. Muhin, I. V. Mezencev // Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. – 2013. – № 1 (12) – S. 251–254.
8. Hladagenty i hladonositeli sistem kondicionirovaniya vozduha / A. A. Nikitin [et al.] // Nauch. zhurnal NIU ITMO. Ser. Holodil'naya tekhnika i kondicionirovaniye. – 2015. – № 3. – S. 7–12.
9. Ovsyannik, A. V. Opredeleniye parametrov teploobmena pri paroobrazovanii smesevykh hladagentov na vysokoteploprovodnykh poroshkovykh spechennykh kapillyarno-poristykh pokrytyah / A. V. Ovsyannik, E. N. Makeeva // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. ob'edinenij SNG. – 2018. – T. 61, № 1. – S. 70–79.

УДК 621.313.33:62-83-52

**М. Н. Погуляев**

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В УСТРОЙСТВАХ НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ**

*Кандидат технических наук, доцент,  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Гомель,  
Республика Беларусь*

**Аннотация.** Предложена схема устройства нагружения синхронных электрогенераторов резервных источников питания с использованием статических полупроводниковых преобразователей. Показано, что такое устройство является энергосберегающим и позволяет регулировать коэффициент мощности и величину нагрузки генератора.

**Ключевые слова:** резервный электрогенератор, устройство нагружения, управляемый выпрямитель, ведомый инвертор, полупроводниковый преобразователь.