

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.5.048:621.564.2:536.423.1 (043)

**МАКЕЕВА**  
**Екатерина Николаевна**

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ  
СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ  
НА РАЗВИТЫХ ТЕПЛООТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ И ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Минск, 2022

Научная работа выполнена в УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Научный руководитель

**ОВСЯННИК Анатолий Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Официальные оппоненты:

**ВАСИЛЬЕВ Леонард Леонидович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией пористых сред института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси;

**ЩЕМЕЛЕВ Александр Петрович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательским сектором УО «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»

Оппонирующая организация Научно-исследовательское и проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»

Защита состоится 15 сентября 2022 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 2, ауд. 201, телефон ученого секретаря 8 (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 14 июня 2022 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



А. А. Бобич

© Макеева Е. Н., 2022

© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач в современном проектировании различных технологических процессов является экономия материальных и энергетических ресурсов. Ее решение в области холодильной, теплонасосной и криогенной техники связано с созданием высокоэффективной теплообменной аппаратуры. Доля теплообменных аппаратов испарительного и конденсаторного типа в общей массе холодильных и теплонасосных установок составляет 70–80 %, что в большей степени определяет массогабаритные и энергетические показатели установок. Необратимые потери в аппаратах обуславливают до 30–50 % от общих энергетических затрат, а расход энергии при эксплуатации в значительной степени зависит от эффективности теплогидравлических процессов, происходящих в теплообменных аппаратах [1].

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал, что повышение интенсивности теплообмена при кипении может быть достигнуто изменением поверхностных условий процесса. Теплообмен при кипении связан с образованием зародышей паровой фазы на отдельных элементах твердой поверхности, поэтому на этот процесс оказывают влияние не только физические свойства жидкой и паровой фазы, но и определенные физико-химические свойства твердой поверхности (материал, однородность, способ обработки, смачиваемость и другие). Основным и самым эффективным методом интенсификации теплообмена является создание благоприятных поверхностных условий для возникновения и роста паровых пузырей – развитие теплоотдающей поверхности: применение оребрения с определенными геометрическими параметрами и нанесение на поверхность различного рода покрытий. В связи с этим возникает необходимость в выборе способа развития теплоотдающей поверхности применительно к конкретным условиям работы теплообменного аппарата [4].

Для этого необходимы достоверные данные о теплоотдаче при кипении холодильных агентов и о факторах, определяющих интенсивность этого процесса. Использование имеющихся в литературе обобщенных уравнений для расчета теплоотдачи кипящих хладагентов без экспериментальной проверки неправомерно из-за специфических условий работы таких испарителей, а также особенностей теплофизических свойств этих рабочих тел.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого. Тема диссертации утверждена приказом учреждения образования ГГТУ им. П.О. Сухого № 1025–с от 23.12.2011 и соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166): энергобезопасность, энергосбережение, энергоэффективные технологии и техника.

Настоящая работа выполнялась в рамках программы ГПНИ «Энергоэффективность» задания «Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов на гладких и развитых теплоотдающих поверхностях промышленных теплообменных аппаратов», № госрегистрации 20110737, 2011–2013 гг. «Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов», № госрегистрации 20141921, 2014–2015 гг.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель исследований:** выявить влияние режимных параметров, теплофизических свойств жидкости и поверхности, типа поверхности и величины перегрева на интенсивность теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов, теплотехнические, энергетические и экологические характеристики, материалоемкость и массогабаритные показатели теплообменных аппаратов холодильных и теплонасосных установок.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

– определить эколого-энергетический эффект применения смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a и развитых теплообменных поверхностей с наружным поперечным оребрением и капиллярно-пористой поверхностью в холодильных и теплонасосных установках;

– экспериментально исследовать процесс теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на экспериментальных образцах с наружным поперечным оребрением и капиллярно-пористой поверхностью на экспериментальном стенде для

исследования теплообмена при парообразовании на теплоотдающих поверхностях в большом объеме и установить зависимости между коэффициентом теплоотдачи, режимными параметрами, теплофизическими свойствами хладагентов и поверхности, влияющими на интенсивность теплообмена;

– получить эмпирические коэффициенты к обобщенным критериальным уравнениям для определения коэффициентов теплоотдачи и влияния на них различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в теплообменных аппаратах холодильных и теплонасосных установок;

– оценить эффективность кожухотрубного испарителя теплонасосной установки с применением поперечного оребрения и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием и разработать методику расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых поверхностях высокоэффективного теплообменного аппарата испарительного типа, работающий на смесевых озонобезопасных хладагентах.

**Объект исследования:** испарители холодильных и теплонасосных установок.

**Предмет исследования:** теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых теплоотдающих поверхностях, применительно к испарителям холодильных и теплонасосных установок.

#### **Научная новизна**

Установлены зависимости между коэффициентом теплоотдачи и режимными параметрами, теплофизическими свойствами хладагентов и поверхности, типом поверхности и величиной перегрева 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 при давлениях насыщения  $p_n = 0,9\text{--}1,4$  МПа и плотностях теплового потока  $q = 5\text{--}50$  кВт/м<sup>2</sup>. Эти зависимости позволяют выполнять расчеты интенсивности теплоотдачи при кипении вышеуказанных хладагентов на рассматриваемых поверхностях теплообмена при проектировании теплообменных аппаратов холодильных и теплонасосных установок.

Впервые получены эмпирические коэффициенты к критериальным уравнениям для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410 на развитых поверхностях с погрешностью не более  $\pm 20\%$  и определено влияние на них режимных параметров, теплофизических свойств жидкости и поверхности, типа поверхности и величины перегрева, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в аппаратах холодильных и теплонасосных установок.

Получены новые экспериментальные результаты по исследованию процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на развитых теплообменных поверхностях с наружным поперечным оребрением и капиллярно-пористой поверхностью, позволившие научно обосновать эффективность применения испарителей холодильных и теплонасосных установок с поперечным оребрением с трапециевидным, треугольным и параболоидным профилем ребра (высота ребра  $h_p = 12,5$  мм) и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием с оптимальным соотношением между параметрами пористой поверхности (толщина слоя пористого покрытия  $\delta_{сл} = 1$  мм, диаметр частиц  $d_{ч} = 100$  мкм, пористость 50–55 %), использование которых позволяет снизить материалоемкость и массогабаритные показатели. Снижение площади теплообменного аппарата с поперечным оребрением по сравнению с гладкой поверхностью составило  $\approx 42\%$ , поверхности с пористым покрытием –  $\approx 67\%$ .

Разработана методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях высокоэффективного теплообменного аппарата испарительного типа, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении, позволяющая рассчитывать геометрические параметры и общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели. Методика предполагает при определении конструктивных параметров поверхности теплообмена соблюдение расстояния между ребрами не менее двух отрывных диаметров парового пузыря.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Зависимости между коэффициентом теплоотдачи, режимными параметрами, теплофизическими свойствами хладагентов и поверхности, типом поверхности и величиной перегрева, влияющими на теплообмен 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, позволяющие получить соотношения для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении вышеуказанных хладагентов на рассматриваемых поверхностях теплообмена.

2. Обобщающие зависимости с эмпирическими коэффициентами в критериальном и размерном виде для расчета интенсивности процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a при давлениях насыщения  $p_n = 0,9-1,4$  МПа, температурах насыщения  $t_n = 12,9-28,5$  °С, плотностях теплового потока  $q = 5-50$  кВт/м<sup>2</sup>, отличающиеся режимными параметрами, при которых проводились экспериментальные исследования.

3. Новые экспериментальные результаты по исследованию процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на развитых теплообменных поверхностях с наружным поперечным оребрением и капиллярно-пористой поверхностью, позволившие научно обосновать эффективность применения испарителей холодильных и теплонасосных установок с поперечным оребрением с трапецеидальным, треугольным и параболоидным профилем ребра (высота ребра  $h_p = 12,5$  мм) и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием с оптимальным соотношением между параметрами пористой поверхности (толщина слоя пористого покрытия  $\delta_{сл} = 1$  мм, диаметр частиц  $d_ч = 100$  мкм, пористость 50–55 %), использование которых позволяет снизить материалоемкость и массогабаритные показатели. Снижение площади теплообменного аппарата с поперечным оребрением по сравнению с гладкой поверхностью составило  $\approx 42$  %, поверхности с пористым покрытием –  $\approx 67$  %.

4. Методика теплового конструктивного и поверочного расчета поверхности кожухотрубчатого теплообменного аппарата испарительного типа с наружным поперечным оребрением, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении, которая позволяет рассчитывать ее геометрические параметры

и общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели. Методика предполагает при определении конструктивных параметров поверхности теплообмена соблюдение расстояния между ребрами не менее двух отрывных диаметров парового пузыря.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии. Личный вклад соискателя заключается в проведении экспериментальных исследований теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на оребренных и пористых поверхностях в условиях большого объема и получении обобщающих зависимостей для расчета интенсивности процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a. Совместно с научным руководителем, к.т.н., доцентом А. В. Овсянником были определены цель и задачи исследования, проводилось обсуждение и обобщение основных научных результатов исследований. Другие соавторы совместных публикаций (к.т.н., доцент А. В. Шаповалов, Т. С. Юфанова, В. Г. Якимченко) оказывали помощь при проведении экспериментальных исследований, обсуждении и проверке полученных результатов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались на 24 конференциях: VIII Международная научно-техническая конференция (НТК) «Современные проблемы машиноведения» (октябрь 2010 г., г. Гомель); II Всероссийская научно-практическая конференция «Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты» (8–10 декабря 2010 г., г. Махачкала; Международный форум студенческой и учащейся молодежи «Первый шаг в науку – 2012» (17–20 апреля 2012 г., г. Минск); X, XI, XII, XIII и XIV Международные конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Исследования в области машиностроения, энергетики и управления» (28–29 апреля 2011 г., 26–27 апреля 2012 г., 25–26 апреля 2013 г., 24–25 апреля 2014 г., г. Гомель); IX Международная НТК «Машиноведение – 2012» (25–26 октября 2012 г., г. Гомель); XV Международная НТК «Актуальные проблемы энергетики и экологии» (9–11 октября 2013 г., г. Одесса); Международная НТК «Проблемы по-



вышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (15–19 сентября 2014 г., г. Севастополь); Международная НТК «Состояние и приоритеты использования ГХФУ, ГФУ и природных хладагентов, снижение их эмиссий и содержания в системах» (4 февраля 2015 г., г. Санкт-Петербург); XV Всеукраинская НТК молодых ученых и студентов «Эколого-энергетические проблемы современности» (14 апреля 2015 г., г. Одесса); Международная научно-практическая конференция «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (8–11 сентября 2015 г., г. Мелитополь-Кирилівка, Украина); X Международная научно-практическая конференция «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (11–12 сентября 2015 г., г. Одесса); IV Республиканская научно-методическая конференция «Проблемы современного образования в техническом ВУЗе» (октябрь 2015 г., г. Гомель); XVI Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Эколого-энергетические проблемы современности» (14 апреля 2016 г., г. Одесса); XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2017» (14 апреля 2017 г., г. Астана, Казахстан); XVII Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Эколого-энергетические проблемы современности» (14 апреля 2017 г., г. Одесса); Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Состояние, достижения и перспективы холодильной техники и технологии» (24 апреля 2017 г., г. Одесса); XVIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (26 апреля 2018 г., г. Гомель); IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов» (11–12 октября 2018 г., г. Гомель); XIX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (25 апреля 2019 г., г. Гомель); Республиканская научно-практическая конференция «Інноваційне розвиток сучасної науки» (25 апреля 2019 г., г. Андижан, Республика Узбекистан).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные положения диссертации опубликованы в 27 работах, в том числе в 10 статьях в рецензируемых изданиях, из них 6, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 17 публикаций в научно-технических журналах и материалах научно-практических конференций. Общий объем опубликованных материалов – 8,14 авторских листа.

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Подтверждается применением апробированных методов для обработки результатов эксперимента, совпадением экспериментальных и расчетных данных и их хорошим согласованием с данными других авторов, а также научными публикациями результатов исследования в ведущих белорусских, российских и украинских журналах, актами внедрения в учебный процесс и производство.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя и приложений. Полный объем диссертации – 147 страниц. Работа содержит 107 страниц машинописного текста, 45 рисунков на 13 страницах и 14 таблиц на 6 страницах. Список использованных источников в количестве 146 наименований на 14 страницах, из них 33 на иностранных языках, 27 авторских работ на 4 страницах и 7 приложений на 7 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и определено основное направление исследования.

**В первой главе «Аналитический обзор литературных источников по изучению процесса теплообмена при кипении хладагентов»** представлен обзор информационных источников для дальнейшего проведения экспериментальных исследований теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых поверхностях. Рассмотрено влияние различных факторов на интенсификацию теплообмена при кипении. Представлен анализ методов интенсификации теплообмена при кипении хладагентов на теплоотдающих поверхностях.

Несмотря на большое число работ, посвященных механизму теплообмена при кипении, установившихся физических представлений, так

же как и апробированных опытом теоретических уравнений для расчета отдельных характеристик процесса парообразования, в литературе нет. Теоретические решения пока могут рассматриваться лишь как попытки подхода к описанию процесса и носят, в основном, качественный характер. Очевидно, что для создания теории теплообмена при кипении требуется накопление экспериментальных сведений о механизме процесса и о влиянии различных параметров, определяющих его протекание.

Основным элементом промышленных холодильных и теплонасосных установок, к которым применима данная работа, является испаритель, от которого в большей степени зависят массогабаритные параметры и показатели эффективности работы всей установки. Одним из перспективных путей создания эффективных компактных теплообменных аппаратов является повышение интенсивности теплообмена при кипении. Основным способом улучшения теплообмена при кипении является развитие теплоотдающей поверхности со стороны нагреваемой жидкости (наружной поверхности трубок), т. е. со стороны среды с меньшим коэффициентом теплоотдачи. Основные поверхности развиваются посредством выступов, ребер или нанесением на них различного рода покрытий [6].

Для исследования были выбраны кожухотрубные испарители холодильных и теплонасосных установок и основные направления интенсификации теплообмена в них.

**Во второй главе «Обоснование применения смесевых озонобезопасных хладагентов в холодильных и теплонасосных установках»** приведены основные требования к холодильным агентам, особенности термодинамики смесей хладагентов, а также свойства и характеристики для обоснованного выбора типа хладагентов для проведения экспериментальных исследований. Произведено сравнение циклов холодильных и теплонасосных установок для предлагаемых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a и заменяемых хладагентов R22 и R502 по основным показателям эффективности работы холодильной машины: удельной массовой холодопроизводительности и холодильного коэффициента.

В настоящее время становится очевидно, что выбор энергетически эффективных и экологически безопасных хладагентов является важным фактором при проектировании различных видов холодильных и теплонасосных установок.

Хладагенты, отвечающие всем требованиям, найти практически невозможно, поэтому в каждом отдельном случае выбирают хладагент с учетом конкретных условий работы оборудования. Так как среди хлорсодержащих однокомпонентных фреонов нет прямых сравнимых заменителей для R12, R502 и R22, то в последнее время становится актуальным использование смесевых хладагентов, в которых отдельные характеристики путем варьирования пропорций смеси могут быть приведены в соответствие требованиям [12, 21, 26].

В связи с вышесказанным в данной работе для исследования теплообмена при кипении были выбраны следующие хладагенты: R404a ( $\Delta t_g = 0,5 \text{ K}$ ), R407c ( $\Delta t_g = 5-7 \text{ K}$ ), R410a ( $\Delta t_g = 0,15 \text{ K}$ ).

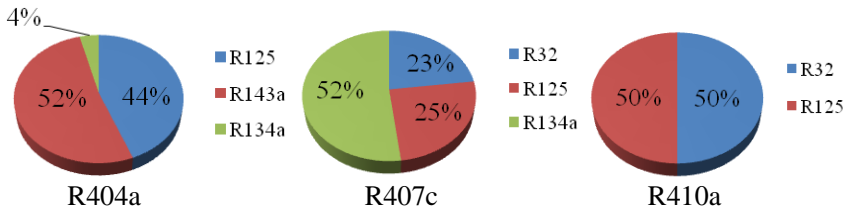


Рисунок 1. – Состав исследуемых хладагентов

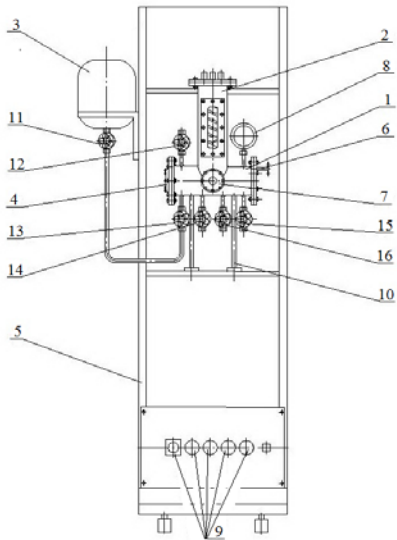
Таблица 1. – Основные расчетные характеристики работы холодильной и теплонасосной установок

Показатель	Удельная массовая холодопроизводительность $q_0$ , Дж/кг		Удельная работа сжатия $l_k$ , кДж/кг		Холодильный коэффициент, $\varepsilon = q_0 / l_k$		$COP = \varepsilon + 1$
	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	
Хладагент	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	ТНУ
R502	131	99	12	20	10,9	4,95	5,95
R404a	147	107	15	21	9,8	5,1	6,1
R22	189	158	18	25	10,5	6,3	7,3
R407c	195	151	15	25	13	6,04	7,04
R410a	204	157	19	29	10,7	5,4	6,4

Сравнение циклов холодильных и теплонасосных установок для предлагаемых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a и заменяемых хладагентов R22 и R502 по основным показателям эффективности работы холодильной машины показало, что предлагаемые смесевые озонобезопасные хладагенты обладают свойствами, которые делают их сопоставимыми альтернативами для ранее применявшихся хладагентов [21, 26].

В третьей главе «Методика проведения экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных» приведены экспериментальные образцы, методика проведения экспериментов, а также оценена максимальная погрешность в определении коэффициента теплоотдачи [1, 3–5, 9, 17–19, 25].

Экспериментальные исследования проводились на стенде, изображенном на рисунке 2.



- 1 – рабочая испарительная камера; 2 – водяной теплообменник-конденсатор; 3 – баллон с жидким фреоном; 4 – крышка под фонарь; 5 – стойка; 6 – вывод термопар; 7 – окно для визуального наблюдения; 8 – манометр; 9 – розетки; 10 – опора; 11–16 – вентили

Рисунок 2. – Схема экспериментального стенда для исследования процессов парообразования в испарителях

Для проведения экспериментальных исследований по кипению озонобезопасных хладагентов в теплообменных аппаратах испарительного типа были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы с оребренной и пористой поверхностями. Образцы с наружным поперечным оребрением представляют собой горизонтальные трубки из дюралюминия, выполненные путем фрезерования и прокатки, с трапециевидальным, треугольным и параболическим профилем ребра. Образцы с пористой поверхностью представляют собой горизонтальные медные трубы, на наружную поверхность которых напеклась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н.

Основные геометрические характеристики образцов представлены в таблицах 2 и 3.

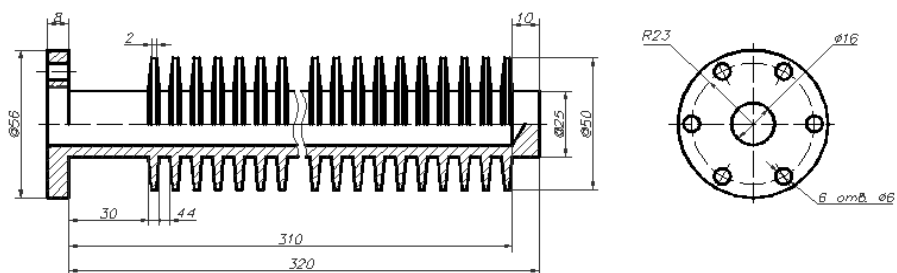
Таблица 2. – Геометрические параметры исследуемых образцов

Образец	$d_o$ , мм	$D_o$ , мм	$d_{вн}$ , мм	$\delta_o$ , мм	$\delta_{вн}$ , мм	$L_o$ , мм	$N_{рп}$ , шт	$h_{рп}$ , мм	$F_o$ , м <sup>2</sup>	$F_{вн}$ , м <sup>2</sup>
1	25	50	16	4	2	320	2 4	12,5	0,013973	0,027161
2					0					0,025277
3					2					0,02725

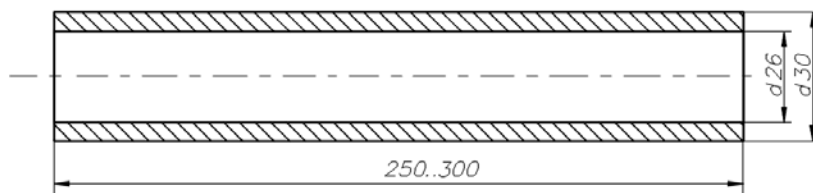
Таблица 3. – Параметры пористого покрытия

Образец	Толщина слоя пористого покрытия $\delta_{сл}$ , мм	Диаметр частиц $d_{ч}$ , мкм	Пористость, %
1	0,5	50	50–55
2		100	
3	0,7	50	
4		100	
5	1	50	
6		100	

Примеры образцов с наружным поперечным оребрением и пористым покрытием представлены на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3. – Образец № 1. Поперечно-орребренная трубка с трапецидальным профилем ребра**



**Рисунок 4. – Медный образец с пористым покрытием**

**В четвертой главе «Экспериментальное исследование процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых поверхностях»** представлены результаты экспериментальных исследований по кипению озонобезопасного хладагента R404a, R407c и R410a на поверхностях с наружным поперечным оребрением с различным профилем ребра и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием при следующих режимных параметрах: при давлениях насыщения  $p_n = 0,9\text{--}1,4$  МПа, температурах насыщения  $t_n = 12,9\text{--}28,5$  °С, плотностях теплового потока  $q = 5\text{--}50$  кВт/м<sup>2</sup>.

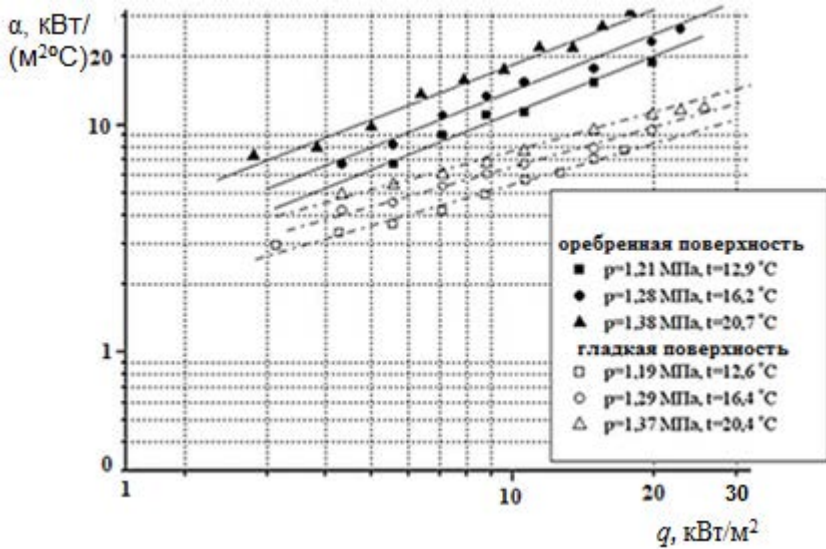
Для того, чтобы удостовериться в надежности полученных опытных данных, на экспериментальной установке были выполнены тарировочные опыты. Были построены графические зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении фреона R134a. Плотность теплового потока изменялась в пределах  $8\text{--}63$  кВт/м<sup>2</sup>, давление насыщения – в пределах  $0,5\text{--}0,8$  МПа ( $t_n = 15,7\text{--}31,1$  °С). Опытные данные настоящего исследования удовлетворительно согласуются с результатами опытов, полученных Р. И. Веббом на гладких горизонтальных трубах, что подтверждает достоверность проведенных впоследствии экспериментов [1].

Во время проведения опытов было замечено, что на ребристых трубах кипение начиналось и прекращалось при более низких значениях тепловых нагрузок, чем на гладкой технически шероховатой поверхности трубки. У основания ребер наблюдается наибольший перегрев жидкости. Ограничение ребрами небольших объемов жидкости обеспечивает больший средний перегрев и улучшение условий роста пузырей [3].

Представленные на графике (рисунок 5) экспериментальные зависимости подтвердили высокую эффективность оребренных поверхностей. Интенсификация процесса теплообмена при кипении наблюдалась во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

Как видно из графика, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на ребристой поверхности значительно выше, чем на гладкой, т. е. при развитом пузырьковом режиме кипения теплообмен на оребренных поверхностях в 2–4 раза интенсивнее, чем на гладкой поверхности [1, 11, 12, 15–18].





**Рисунок 5. – Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреона R410a на оребренной и гладкой поверхностях**

Наличие оребрения приводит к интенсификации теплоотдачи в основном за счет развития поверхности теплообмена и улучшения условий зарождения и роста паровых пузырей. Величина коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкости зависит от давления, повышение которого приводит к интенсификации теплообмена, причем степень влияния давления по-разному проявляется в зависимости от вида теплоотдающей поверхности и теплофизических свойств жидкости [3].

Одними из перспективных капиллярно-пористых покрытий теплоотдающей поверхности на данный момент признаны спеченные высокотеплопроводные порошковые капиллярно-пористые структуры. К основным достоинствам таких структур относят технологичность изготовления, высокие прочностные свойства, относительно невысокую стоимость, хорошее сочетание капиллярных свойств и высокой эффективной теплопроводности, возможность варьирования в широких пределах структурных параметров [4, 19].

Визуальные наблюдения за процессом кипения показали наличие устойчивого пузырькового кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в области малых тепловых нагрузок, при которых для ребри-

стых и особенно гладких труб характерен режим свободной конвекции. При этом число стабильно действующих центров парообразования существенно выше, а отрывные размеры пузырей меньше, чем на гладких поверхностях [4].

На рисунке 6 представлены экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием с различной толщиной и средним диаметром частиц.

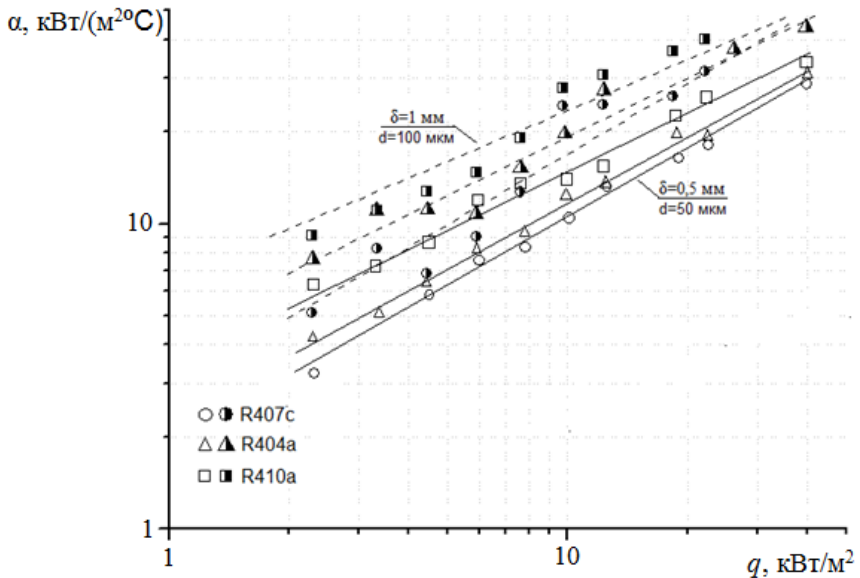


Рисунок 6. – Экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием при различной толщине и среднем диаметре частиц

Более значительная интенсивность теплоотдачи наблюдалась при толщине слоя пористого покрытия 1 мм и диаметре частиц 100 мкм.

На рисунке 7 приведено сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на различных типах поверхностей. Использованы данные при кипении на ребренной поверхности с трапецевидным профилем ребра и пористой поверхности с толщиной 1 мм и средним диаметром частиц 100 мкм.

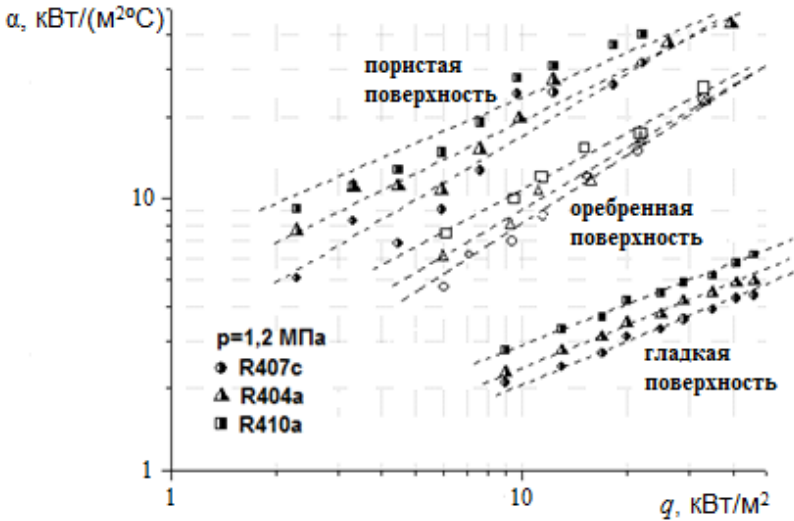


Рисунок 7. – Сравнение интенсивности теплообмена при кипении исследуемых фреонов на разных типах поверхностей при давлении насыщения  $p = 1,2$  МПа

Как видно из графика, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием значительно выше, чем на гладкой (в 4 раза) и оребренной (в 1,5 раза), что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Применение испарительных трубок с нанесенным капиллярно-пористым покрытием приведет к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными [4].

В пятой главе «Разработка методики по расчету и проектированию высокоэффективного испарительного оборудования холодильных и теплонасосных установок» приведен анализ экспериментальных данных, обобщающие зависимости в размерном виде, а также критериальные уравнения с эмпирическими коэффициентами на основе теории подобия для определения коэффициентов теплоотдачи при кипении. Научно обоснована эффективность применения испарителей холодильных и теплонасосных установок с поперечным оребрением

с трапецидальным, треугольным и параболическим профилем ребра и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием с оптимальным соотношением между параметрами пористой поверхности, использование которых позволяет снизить материалоемкость и массогабаритные показатели. Представлена методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренной поверхности высокоэффективного теплообменного аппарата испарительного типа, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении.

В настоящее время не существует единого общепринятого математического описания данного процесса и, как следствие, не существует единой системы чисел подобия, которая используется при обработке опытных данных. Основываясь на той или иной физической модели процесса, авторы применяют различные исходные математические описания процесса, на основе которых получают свою систему чисел подобия. В подтверждение сказанного рассмотрен ряд уравнений подобия для расчета теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости. А именно, рассмотрим уравнения В. И. Толубинского, С. С. Кутателадзе и Д. А. Лабунцова [9].

Было произведено сопоставление опытных и расчетных данных, полученных по трем указанным формулам. Выявлено, что наиболее точно описывает процесс теплообмена при кипении смесевых хладагентов зависимость, полученная на основе уравнения Кутателадзе.

Эмпирическое уравнение подобия для теплоотдачи при кипении смесевых хладагентов, полученное на основе уравнения С. С. Кутателадзе, будет иметь вид:

$$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{0,7} \cdot K_p^{0,7} \cdot Pr^{0,5}, \quad (1)$$

где  $Re = \frac{q \cdot l_0}{r \cdot \rho \cdot v}$  – число Рейнольдса;

$K_p = \frac{P \cdot l_0}{\sigma}$  – критерий давления.

Расчетное уравнение для теплоотдачи при кипении смесового зетропного хладагента R407с с учетом температурного глайда будет иметь вид:

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

где  $k_{\text{гл}} = 1 - 0,03 \cdot \Delta t_g$  – поправка на температурный глайд (для хладагента R407с  $k_{\text{гл}} = 0,8$ ).

Расхождение между расчетными и опытными данными составило не более 12 % для R404а, не более 20 % для R407с и не более 16 % для R410а, что позволяет использовать зависимость, полученную на основании уравнения Кутателадзе, с предложенными коэффициентами в технических расчетах.

При обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении хладагентов на медных спеченных капиллярно-пористых структурах в условиях большого объема была получена следующая критериальная зависимость [4]:

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

где  $K_{\text{пор}} = \frac{\delta_{\text{кк}}}{d_0}$  – коэффициент, учитывающий геометрические характеристики капиллярно-пористой структуры;

$K = \frac{q}{r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \omega''}$  – критерий, различный для разных видов конвек-

тивного теплообмена: для свободной конвекции – это число Грасгофа или Архимеда, для вынужденного движения – критерий Пекле или Рейнольдса;

$d_0$  – средний гидравлический размер пор, м;

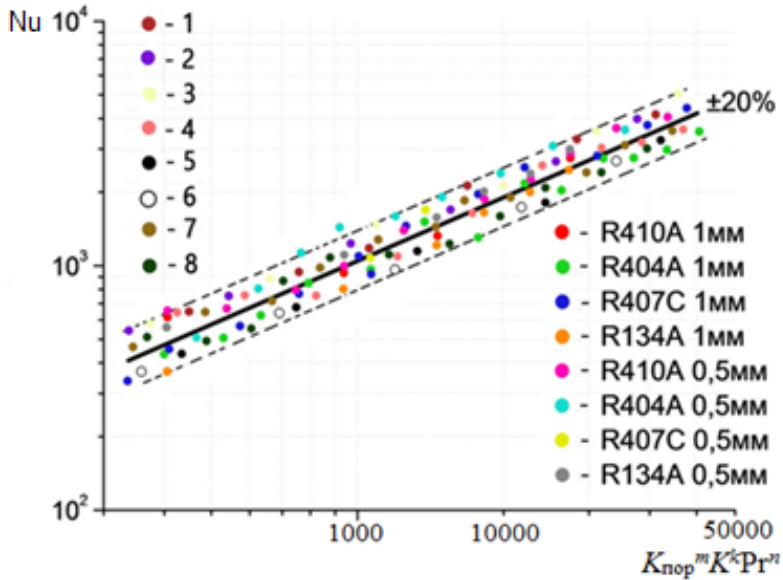
$\delta_{\text{кк}}$  – толщина капиллярной структуры, м;

$\omega''$  – скорость роста паровых пузырей, м/с.

С учетом температурного глайда расчетное уравнение для теплоотдачи при кипении смесового зетропного хладагента R407с будет иметь вид:

$$\text{Nu} = 45 \cdot k_{\text{гл}} \cdot K_{\text{пор}}^{0,7} K^{0,9} \text{Pr}^{0,6}. \quad (4)$$

Обобщающая кривая экспериментальных данных по теплообмену при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R134a, R404a, R407c и R410a на поверхностях с пористым покрытием в соответствии с соотношением (3) представлена на рисунке 8.



1, 2, 3, 4 – при давлении  $p_n = 1,3$  МПа;

5, 6, 7, 8 – при давлении  $p_n = 1,1$  МПа

**Рисунок 8.** – Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхности со спеченной пористой структурой при давлении  $p_n = 1,2$  МПа с различной толщиной покрытия с помощью зависимости (3)

Видно, что опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя, давлений ( $p_n = 0,9-1,4$  МПа) и тепловых нагрузок ( $q = 5-50$  кВт/м<sup>2</sup>). Соотношение (3) позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  с погрешностью  $\pm 20$  %. Предложенная зависимость может быть использована

в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа [4].

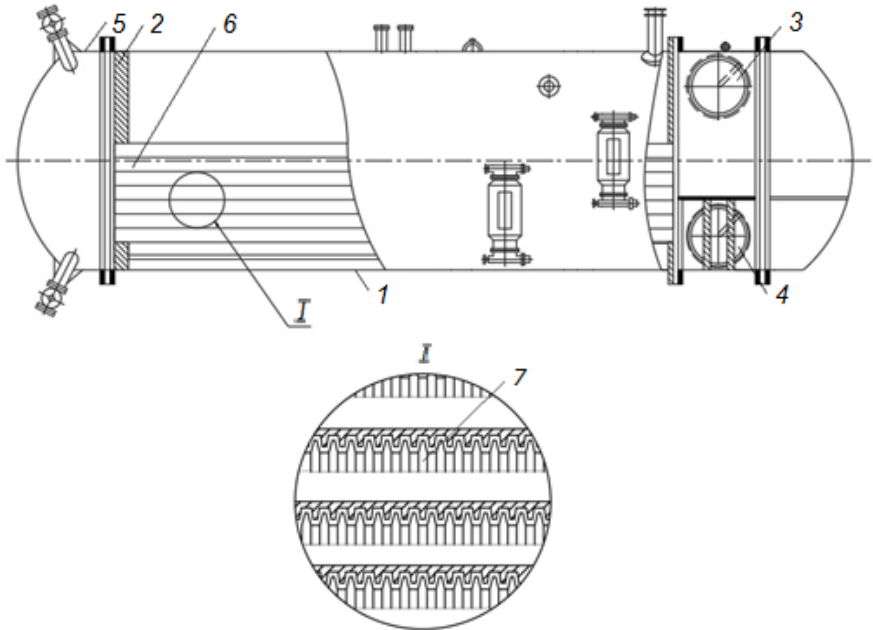
Произведена оценка эффективности кожухотрубного испарителя теплонасосной установки с применением поперечного оребрения и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием по методике для горизонтального кожухотрубного испарителя затопленного типа для хладагента R410a [24].

Таблица 4. – Результаты расчета

Параметр	Размерность	Поверхность		
		из гладких труб	из оребренных труб	из труб с пористым покрытием
Плотность теплового потока в аппарате	Вт/м <sup>2</sup>	1613	3277	5149
Разность температур кипения и стенки трубы	°С	5,5	4,1	2,5
Диаметр кожуха	м	0,57	0,52	0,39
Число ходов в аппарате	–	14	8	4
Общее число труб в аппарате	шт	196	112	56
Площадь теплообменного аппарата	м <sup>2</sup>	31	17,94	10,25
Гидравлическое сопротивление	Па	7717	3735	2408

Результаты расчета показали, что наиболее эффективными являются испарители для охлаждения жидкостей с теплопередающей поверхностью с пористым покрытием, что позволит снизить материалоемкость и массогабаритные показатели теплообменных аппаратов с капиллярно-пористым покрытием по сравнению с теплообменными аппаратами с гладкой и оребренной поверхностью [24].

Представлен кожухотрубный теплообменный аппарат испарительного типа с поперечным наружным оребрением с трапецидальным профилем ребра (рисунок 9) [6, 22].



1 – кожух; 2 – трубная решетка; 3, 4 – штуцеры для входа и выхода хладоносителя; 5 – крышка; 6 – трубы; 7 – ребра  
**Рисунок 9. – Фреоновый кожухотрубчатый испаритель затопленного типа с оребренными трубами**

Разработана методика теплового конструктивного и поверочного расчета оребренной поверхности, которая представлена принципиальной блок-схемой на рисунке 10. Предложенная методика теплового конструктивного расчета оребренной поверхности позволяет рассчитывать ее геометрические параметры, общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели [6, 22].





**Рисунок 10. – Блок-схема теплового конструктивного расчета оребренной поверхности**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Определен эколого-энергетический эффект применения смесевых озонобезопасных хладагентов путем сравнения циклов холодильных и теплонасосных установок для предлагаемых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a и заменяемых хладагентов R22 и R502 по основным показателям эффективности работы холодильной машины: удельной массовой холодопроизводительности и холодильного коэффициента, которое показало, что предлагаемые смесевые озонобезопасные хладагенты обладают свойствами, которые делают их сопоставимыми альтернативами для ранее применявшихся хладагентов [11–15, 21, 26, 27].

2. Разработан экспериментальный стенд для исследования теплообмена при парообразовании на теплоотдающих поверхностях в большом объеме, который позволяет определить интенсивность теплообмена с погрешностью не более 20 %, с экспериментальными образцами с наружным поперечным оребрением с треугольным, трапецевидным и параболоидным профилем ребра, представляющие собой горизонтальные трубки из дюралюминия диаметром 50 мм, длиной 32 мм, с количеством ребер 24 шт высотой 12,5 мм; образцы с пористой поверхностью, представляющие собой горизонтальные медные трубы размером 26×2 мм, на наружную поверхность которых напеклась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н, толщиной слоя пористого покрытия 0,5–1 мм, с диаметром частиц 50–100 мкм, пористостью 50–55 % [1, 3–5, 9, 17–19, 25].

3. Установлены зависимости между коэффициентом теплоотдачи, режимными параметрами, теплофизическими свойствами хладагентов и поверхности, типом поверхности и величиной перегрева, влияющими на интенсивность теплообмена, в условиях большого объема на основании 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 при следующих режимных параметрах: при давлениях насыщения  $p_n = 0,9–1,4$  МПа, температурах насыщения  $t_n = 12,9–28,5$  °С, плотностях теплового потока  $q = 5–50$  кВт/м<sup>2</sup>. Установлено, что коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуе-

мых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием значительно выше, чем на гладкой (в 4 раза) и в 1,5 раза выше, чем на оребренной поверхности, что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Кипение на капиллярно-пористых покрытиях приводит к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными [2–7, 8, 11–15, 17–19, 23].

4. В результате обобщения полученных результатов при кипении хладагентов на оребренных трубах и поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием впервые установлены эмпирические коэффициенты для соотношений в критериальном и размерном виде, позволяющие рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a в диапазоне подводимых тепловых потоков  $5\text{--}50 \text{ кВт/м}^2$  и давлений насыщения в пределах  $0,9\text{--}1,4 \text{ МПа}$  в условиях большого объема. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются полученным эмпирическим уравнением с погрешностью  $\pm 20 \%$ , что позволяет использовать его для инженерных расчетов испарителей современных холодильных машин и теплонасосных установок [2–7, 16].

5. Получены новые экспериментальные результаты по исследованию процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на развитых теплообменных поверхностях с наружным поперечным оребрением и капиллярно-пористой поверхностью, позволившие научно обосновать эффективность применения испарителей холодильных и теплонасосных установок с поперечным оребрением с трапецеидальным, треугольным и параболоидным профилем ребра (высота ребра  $h_p = 12,5 \text{ мм}$ ) и с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием с оптимальным соотношением между параметрами пористой поверхности (толщина слоя пористого покрытия  $\delta_{\text{сл}} = 1 \text{ мм}$ , диаметр частиц  $d_q = 100 \text{ мкм}$ , пористость  $50\text{--}55 \%$ ), использование которых позволяет снизить материалоемкость и массогабаритные показатели. Снижение площади теплообменного аппарата с поперечным оребрением по сравнению с гладкой поверхностью составило  $\approx 42 \%$ , поверхности с пористым покрытием –  $\approx 67 \%$  [6, 22, 24, 25].

6. Разработана методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях высокоэффективного теплообмен-

ного аппарата испарительного типа, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении, позволяющая рассчитывать геометрические параметры и общую площадь поверхности теплообмена аппаратов испарительного типа, а также их массогабаритные показатели. Методика предполагает при определении конструктивных параметров поверхности теплообмена соблюдение расстояния между ребрами не менее двух отрывных диаметров парового пузыря [6, 22, 25].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Практическая значимость состоит в разработке критериальных уравнений с полученными эмпирическим путем коэффициентами для методики расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на оребренных поверхностях. Результаты исследования могут быть использованы для расчета и разработки теплообменных аппаратов испарительного типа холодильных, теплонасосных установок и систем кондиционирования.

В ЧИП «Веза-Г» используются расчетные зависимости для определения интенсивности теплоотдачи при кипении смесевых хладагентов в испарителях установок кондиционирования воздуха (экономический эффект – 1,92 млн рос. руб. (акт о практическом использовании результатов исследования).

Результаты исследований также внедрены в учебный процесс при чтении лекций в ГГТУ им. П.О. Сухого по курсам «Тепломассообмен» и «Промышленные тепломассообменные процессы и установки» (акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс).

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Статьи в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований**

1. Овсянник, А. В. Исследование процесса теплообмена при парообразовании озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях / А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Е. Н. Волкова, В. Г. Якимченко,

А. В. Родин // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1 (52) – С. 68–74.

2. Овсянник, А. В. Установление эмпирических зависимостей и разработка критериальных уравнений для описания интенсивности процесса теплообмена при парообразовании хладагентов R404a, R407c и R410a на технически гладких теплоотдающих поверхностях / А. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, Т. С. Юфанова // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2014. – № 4. – С. 58–63.

3. Макеева, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных теплоотдающих поверхностях / Е. Н. Макеева // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 72–78.

4. 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. Т. 61. – 2018. – № 1. – С. 70–79.

5. Макеева, Е. Н. Интенсивные теплообменные поверхности для испарителей холодильных и теплонасосных установок на смесевых озонобезопасных гидрофторуглеродах / Е. Н. Макеева, О. А. Кныш // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2019. – № 3. – С. 71–76.

6. Овсянник, А. В. Проектирование высокоэффективного испарительного оборудования, работающего на смесевых озонобезопасных хладагентах / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 1. – С. 76–81.

### **Статьи в рецензируемых тематических журналах**

7. Овсянник, А. В. Исследование процесса теплообмена при парообразовании озонобезопасных хладагентов R404A и R407C на гладких поверхностях / А. В. Овсянник, Т. С. Наумова, Е. Н. Волкова, В. Г. Якимченко // Научно-технический журнал «Холодильная техника и технология» – 2013. – № 6. – С. 175–181.

8. Овсянник, А. В. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена при развитом пузырьковом кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях / А. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, Т. С. Наумова, В. Г. Якимченко // Научно-технический журнал «Холодильная техника и технология» – 2014. – № 4 (150). – С. 22–29.

9. Овсянник, А. В. Обобщенные расчетные зависимости для определения интенсивности теплообмена при кипении смесевых хладагентов / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Холодильная техника. – 2015. – № 12. – С. 33–37.

10. Макеева, Е. Н. Обоснование применения рабочих веществ «нового поколения» в испарителях холодильных и теплонасосных установок / Е. Н. Макеева, О. А. Кныш // Научно-технический журнал «Холодильная техника и технология». – 2019. – № 55 (4). – С. 211–215.

### **Тезисы и материалы научных конференций**

11. Овсянник, А. В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении озонобезопасных веществ / А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Н. А. Вальченко, Т. С. Юфанова, Е. Н. Волкова // Тезисы докладов VIII Межд. науч.-тех. конф. «Современные проблемы машиноведения» – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – С. 158–159.

12. Волкова, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов / Е. Н. Волкова // Материалы X Межд. межвуз. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 170 с.

13. Волкова, Е. Н. Характеристики процесса теплообмена при парообразовании однокомпонентного хладагента R134a и зеотропного смесового хладагента R407c в условиях свободного объема / Е. Н. Волкова // Материалы XI Межд. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления». – 2011. – С. 168–171.

14. Волкова, Е. Н. Теплообмен при кипении озонобезопасного хладагента R134a в условиях повышенных температур кипения / Е. Н. Волкова, В. Г. Якимченко // Материалы XII Межд. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления». – 2012. – С. 204–207.

15. Волкова, Е. Н. Исследование процесса теплообмена при парообразовании озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях / Е. Н. Волкова, В. Г. Якимченко, А. В. Родин // Тезисы докладов IX Межд. науч.-тех. конф. «Современные проблемы машиноведения». – 2012. – С. 139–140.

16. Волкова, Е. Н. Получение критериальных уравнений для определения коэффициентов теплоотдачи при парообразовании хладагентов R404A и R407C на технически гладких теплоотдающих поверхностях / Е. Н. Волкова // Материалы XIII Межд. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления». – 2013. – С. 167–170.

17. Макеева, Е. Н. Интенсификация теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на ребренных поверхностях / Е. Н. Макеева // Сборник научных трудов всеукраинской науч.-тех. конф. молодых ученых и студентов «Еколого-енергетичні проблеми сучасності». – Одесса : Издательство ОНАХТ, 2015. – С. 198–201.

18. Макеева, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на ребренных поверхностях теплообменных аппаратов холодильных установок / Е. Н. Макеева // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: Межд. науч.-практ. конф. – Харьков : ХДУХТ, 2015. – С. 65–66.

19. Макеева, Е. Н. Интенсификация теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / Е. Н. Макеева // Сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». – Одесса : Издательство ОДАХ, 2015. – С. 82–85.

20. Овсянник, А. В. Использование результатов исследования теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов в преподавании дисциплины «Тепломассообмен» / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева, Т. С. Юфанова, В. Г. Якимченко // Проблемы современного образования в техническом ВУЗе: материалы IV Респ. науч.-метод. конф., посвящ. 120-летию со дня рождения П. О. Сухого, Гомель, 29–30 окт. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. В. Сычева. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – С. 179–181.

21. Макеева, Е. Н. Влияние температурного глайда смесевых хладагентов на работу холодильной системы / Е. Н. Макеева, С. А. Радош // Сборник научных трудов всеукраинской науч.-тех. конф. молодых ученых и студентов «Еколого-енергетичні проблеми сучасності». – Одесса : Издательство ОНАХТ, 2016. – С. 198–201.

22. Овсянник, А. В. Расчет и подбор высокоэффективного испарительного оборудования теплонасосных установок / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // Сборник научных трудов всеукраинской науч.-тех. конф. молодых ученых и студентов «Эколого-энергетические проблемы современности». – Одесса : Издательство ОНАХТ, 2017. – С. 50–51.

23. Макеева, Е. Н. Теплообмен при кипении смесевых хладагентов на пористых теплоотдающих поверхностях / Е. Н. Макеева // Сборник тезисов докладов всеукраинской науч.-тех. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов «Состояние, достижения и перспективы холодильной техники и технологии». – Одесса, 2017. – С. 61–62.

24. Макеева, Е. Н. Оценка эффективности теплообмена на пористых поверхностях при кипении хладагентов / Е. Н. Макеева // Сборник материалов XII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование» – Астана, 2017. – С. 7019–7023.

25. Макеева, Е. Н. Интенсивные теплообменные поверхности для испарителей холодильных и теплонасосных установок с использованием смесевых озонобезопасных хладагентов / Е. Н. Макеева // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Ч. 1. – С. 188–189.

26. Макеева, Е. Н. Применение рабочих веществ «нового поколения» в испарителях холодильных и теплонасосных установок / Е. Н. Макеева, О. А. Кныш // Материалы XIX Межд. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления». – 2019. – С. 194–197.

27. Кныш, О. А. Энергетическое и экологическое обоснование применения рабочих веществ R513a, R1234yf и R448a в испарителях холодильных и теплонасосных установок / О. А. Кныш, Е. Н. Макеева // Инновационное развитие современной науки: Республиканская научно-практическая конференция. – Анджиан, 2019. – С. 212–216.





## РЕЗЮМЕ

**Макеева Екатерина Николаевна**

### **Теплообмен при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на развитых теплоотдающих поверхностях холодильных и теплонасосных установок**

**Ключевые слова:** теплообмен при кипении, смесевой озонобезопасный хладагент, интенсивность теплообмена, коэффициент теплоотдачи, оребренные и пористые поверхности, испаритель, теплообменный аппарат, холодильная установка, критериальное уравнение.

**Цель работы:** выявить влияние режимных параметров, теплофизических свойств жидкости и поверхности, типа поверхности и величины перегрева на интенсивность теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов, теплотехнические, энергетические и экологические характеристики, материалоемкость и массогабаритные показатели теплообменных аппаратов холодильных и теплонасосных установок.

**Методы исследования:** исследование теплообмена при кипении хладагентов проводилось в соответствии с теорией планирования эксперимента. Обработка результатов экспериментов и получение эмпирических зависимостей осуществлялось на основании теории подбора и с помощью программ Origin 6.1, Excel и MathCad.

**Научная новизна полученных результатов:** Установлены зависимости между коэффициентом теплоотдачи и режимными параметрами, теплофизическими свойствами хладагентов и поверхности, типом поверхности и величиной перегрева 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. Впервые получены эмпирические коэффициенты к критериальным уравнениям для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410 на развитых поверхностях с погрешностью до  $\pm 20$  %. Разработана методика расчета для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании смесевых озонобезопасных хладагентов на оребренных поверхностях высокоэффективного теплообменного аппарата испарительного типа, учитывающая геометрические параметры оребренной поверхности и зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований теплообмена при кипении.

**Рекомендации по использованию:** Результаты работы использованы в ЧИП «Веза-Г» и учебном процессе.

**Область применения:** холодильные и теплонасосные установки, системы кондиционирования.

## РЭЗІЮМЭ

Макеева Кацярына Мікалаеўна

**Цеплаабмен пры кіпенні сумесевых ознобезопасных холадагентаў на развітых цеплааддаючымі паверхнях халадзільных і цеплапомпавых устаноўак**

**Ключавыя словы:** цеплаабмен пры кіпенні, параўтварэнне, смесевой ознобезопасный хладагент, інтэнсіўнасць цеплаабмену, каэфіцыент цеплааддачы, оребренные і кіпрыя паверхні, выпарнік, цеплаабменны апарат, Халадзільная ўстаноўка, эмпірычная залежнасць, крытэрыяльнае раўнанне.

**Мэта працы:** выявіць ўплыў рэжымных параметраў, цеплафізічных уласцівасцяў вадкасці і паверхні, тыпу паверхні і велічыні перагрэву на інтэнсіўнасць цеплаабмену пры кіпенні сумесевых ознобезопасных холадагентаў, цеплатэхнічныя, энергетычныя і экалагічныя характарыстыкі, матэрыялаемістасць і масагабарытныя паказчыкі цеплаабменных апаратаў халадзільных і цепланасосных устаноўак.

**Метады даследавання:** даследаванне цеплаабмену пры кіпенні холадагентаў праводзілася ў адпаведнасці з тэорыяй планавання эксперыменту. Апрацоўка вынікаў эксперыментаў і атрыманне эмпірычных залежнасцяў ажыццяўлялася на падставе тэорыі падабенства і з дапамогай праграм Origin 6.1, Excel і MathCad.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў:** Устаноўлены залежнасці паміж каэфіцыентам цеплааддачы і рэжымнымі параметрамі, цеплафізічнымі ўласцівасцямі хладагентаў і паверхні з розным профілем рэбры і з высокацеплаправодным спеченым капілярна-порыстым пакрыццём. Упершыню атрыманы эмпірычныя каэфіцыенты да крытэрыяльных раўнанняў для разліку каэфіцыента цеплааддачы пры кіпенні сумесевых аэонабяспечных холадагентаў R404a, R407c і R410 на развітых паверхнях з хібнасцю да  $\pm 20$  %. Распрацавана метадыка разліку для вызначэння інтэнсіўнасці цеплааддачы пры параўтварэнні сумесевых аэонабяспечных хладагентаў на оребренных паверхнях высокаэфектыўнага цеплаабменнага апарата испарительного тыпу, якая ўлічвае геаметрычныя параметры оребренной паверхні і залежнасці, атрыманыя ў выніку эксперыментальных даследаванняў цеплаабмену пры кіпенні.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** Вынікі працы выкарыстаныя ў ПЗП «Вега-Г» і навучальным працэсе.

**Вобласць ужывання:** халадзільныя і цеплапомпавыя ўстаноўкі, сістэмы кандыцыянавання.

## SUMMARY

Makeeva Ekaterina Nikolaevna

### Heat exchange during boiling of mixed ozone-safe refrigerants on the developed heat-emitting surfaces of refrigeration and heat pump installations

**Keywords:** heat transfer during boiling, vaporization, mixed ozone-safe refrigerant, heat transfer intensity, heat transfer coefficient, finned and porous surfaces, evaporator, heat exchanger, refrigeration unit, empirical dependence, criterion equation.

**Objective:** to identify the influence of operating parameters, thermophysical properties of the liquid and surface, surface type and the magnitude of overheating on the intensity of heat exchange during boiling of mixed ozone-safe refrigerants, thermal, energy and environmental characteristics, material capacity and weight and size parameters of heat exchangers of refrigeration and heat pump installations.

**Research methods:** the study of heat transfer during the boiling of refrigerants was carried out in accordance with the theory of experiment planning. Processing of the experimental results and obtaining empirical dependences was carried out on the basis of the theory of similarity and using the programs Origin 6.1, Excel and MathCad.

**Scientific novelty of the results obtained:** Dependences between the heat transfer coefficient and regime parameters, thermophysical properties of refrigerants and surface, surface type and superheat value are established on the basis of the first experimental studies of heat transfer during boiling of mixed ozone-friendly refrigerants R404a, R407c and R410a on surfaces with external transverse finning with different rib profiles and with a highly thermally conductive sintered capillary-porous coating. For the first time, empirical coefficients were obtained for the criterion equations for calculating the heat transfer coefficient during boiling of mixed ozone-friendly refrigerants R404a, R407c and R410 on developed surfaces with an error of up to  $\pm 20$  %. A calculation procedure has been developed to determine the intensity of heat transfer during the vaporization of mixed ozone-friendly refrigerants on finned surfaces of a highly efficient evaporative type heat exchanger, taking into account the geometric parameters of the finned surface and the dependencies obtained as a result of experimental studies of heat transfer during boiling.

**Recommendations for use:** The results of the work were used in the PFE «Vesa-G» and the educational process.

**Application field:** refrigeration and heatpumping units, air conditioning systems.

Научное издание

**МАКЕЕВА**  
**Екатерина Николаевна**

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ  
СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ  
НА РАЗВИТЫХ ТЕПЛОТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ И ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 09.06.2022. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,98. Уч.-изд. л. 1,55. Тираж 60. Заказ 383.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.