

На правах рукописи



КОШЕЛЕВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА В ИСПАРИТЕЛЯХ**

Специальность 05.08.05 - Судовые энергетические установки и их
элементы (главные и вспомогательные)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Калининград – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный руководитель - Сластихин Юрий Николаевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Костылев Иван Иванович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой «Теплотехника, судовые котлы и вспомогательные установки»

Малышев Александр Александрович
кандидат технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», заведующий кафедрой «Холодильные машины и низкопотенциальная энергетика»

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств»

Защита состоится 1 октября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 307.007.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» по адресу: 236022, Калининград, проспект Советский, дом №1, аудитория 255.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru «15» июля 2019 г. и на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://vak3.ed.gov.ru> « » 2019 г.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н. Ю. Бугакова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Монреальский протокол 1987 года и другие международные соглашения по охране окружающей среды предопределили переход на озонобезопасные хладагенты. Методики расчета, представленные в отечественной литературе, распространяются лишь на несколько традиционных хладагентов. Их нельзя использовать при переходе на новые хладагенты, что затрудняет проектирование, подбор и анализ эксплуатации испарителей с внутритрубным кипением хладагента. В связи с этим возникла необходимость в разработке современных методов теплового и гидромеханического расчёта испарителей, которые базируются на обобщенных методиках определения локальных коэффициентов теплоотдачи (КТО) и падений давления, учитывающих теплофизические и термодинамические свойства хладагента. Ранее тепловой и гидравлический расчеты проводились отдельно, а нередко падение давления хладагента не определялось, что могло приводить к снижению производительности компрессора и росту удельного энергопотребления.

Холодильные машины (ХМ), применяемые на морских судах для хранения скоропортящихся продуктов и комфортного кондиционирования воздуха, способствуют обеспечению жизнедеятельности людей. Без ХМ невозможно функционирование судов занятых добычей, переработкой, хранением и транспортировкой морепродуктов, а также судов-газовозов. На многих танкерах системы технического кондиционирования используются для предотвращения взрыва парообразных нефтепродуктов и снижения коррозии внутренних конструкций танков. В сумме ХМ разного назначения потребляют значительную долю вырабатываемой на судне электроэнергии, поэтому эффективная их работа имеет важное значение. Подбор оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров на стороне хладагента повышает энергоэффективность судовых холодильных систем. При большом суммарном потреблении энергии многочисленными ХМ оптимизация их параметров необходима с позиций, как экономии энергоресурсов, так и снижения загрязнения окружающей среды тепловыми и иными выбросами.

Таким образом, исследование и развитие методов определения параметров, характеризующих интенсивность теплоотдачи и понижение температуры насыщения в процессе кипения хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках, является актуальной научной задачей, имеющей важное значение как для создания энергоэффективных и экологически чистых судовых ХМ, так и для выбора режимов их эксплуатации.

Степень научной разработанности проблемы. Большой вклад в исследование теплоотдачи и гидродинамики двухфазных потоков внесли такие известные отечественные ученые как: С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский, М.А. Стырикович, Г.Н. Данилова, Д. А. Лабунцов, А.А. Гоголин, Ю.В. Захаров, А.В. Клименко, И.Т. Аладьев, Б.С. Петухов, А.А. Малышев, В.Г. Букин, А.В. Дедов. Изучением режимов течения двухфазных потоков при кипении жидкостей в гладких трубах также занимались Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин.

Среди зарубежных исследователей, занимавшихся данной темой, стоит отметить: Shah M.M., Kandlikar S.G., Thome J.R., Domanski P.A., Wang C., Winterton R.H.S. Из современных исследователей, занимающихся оптимизацией процессов в теплообменных аппаратах, можно отметить Granryd E., А.Л. Емельянова, Т.А. Лопаткину.

Цель исследования – научное обоснование методов повышения энергоэффективности судовых холодильных машин за счет совершенствования процессов внутритрубного кипения хладагентов в испарителях.

Объект исследования – испарители судовых ХМ с кипением озонобезопасных хладагентов.

Предмет исследования – гидродинамика и теплообмен при кипении хладагентов в трубах судовых испарителей.

Задачи исследования:

1. Сравнительный анализ методов расчета локального КТО и падения давления при кипении жидкостей в горизонтальных трубах; выбор и апробация наиболее перспективных методик;
2. Расширение рабочего диапазона методик расчета локальных КТО и градиентов давления.
3. Разработка алгоритмов и программ совместного расчета показателей гидродинамики и теплообмена при кипении хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках.
4. Получение уравнений для расчета среднего КТО и полного падения давления при внутритрубном кипении ряда современных хладагентов.
5. Подбор оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров испарителей на стороне хладагента. Обобщение результатов подбора.

Методология и методы исследования: а) обобщенные расчётно-экспериментальные методики определения интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении жидкостей в трубах; б) численный метод нахождения экстремума искомой функции; в) регрессионный анализ обобщаемых данных; г) теплотехнические испытания змеевикового воздухоохладителя (ВО).

Научная новизна исследования определяется тем, что:

1. Впервые разработаны и реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы совместного расчета интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках, учитывающие особенности турбулентного, переходного и ламинарного режимов течения двухфазного потока.
2. Получены уравнения для расчета среднего КТО и полного падения давления при внутритрубном кипении семи хладагентов в зависимости от конкретного сочетания семи влияющих факторов.
3. Обоснована целесообразность определения оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров кипения хладагентов в змеевиковых испарителях численным методом, получены степенные

зависимости с численными коэффициентами для определения оптимальной скорости $(w\rho)_0$ или длины зоны кипения $l_{\text{ко}}$.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке алгоритма и составлении компьютерных программ для совместного расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении разных хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках. Выведены уравнения, позволяющие находить искомые величины без использования компьютерной программы по конкретным исходным данным. Предложена методика определения оптимальной массовой скорости хладагента $(w\rho)_0$ в зависимости от плотности теплового потока q , а также оптимальной длины зоны кипения $l_{\text{ко}}$ в зависимости от тепловой нагрузки Q_0 . Подобраны и обобщены в виде степенных зависимостей оптимальные сочетания $(w\rho)_0$ и q , а также $l_{\text{ко}}$ и Q_0 для семи хладагентов в широком диапазоне исходных данных. Создана экспериментальная установка и проведены теплотехнические испытания при кипении хладагента R410A в испарителе с внутренним микро-оребрением труб.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы и программы совместного расчета показателей интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках судовых ХМ.
2. Уравнения с численными коэффициентами для расчета среднего КТО и полного падения давления хладагента, учитывающие сочетание семи влияющих факторов.
3. Методика и результаты численного подбора оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров кипения хладагентов в змеевиковых испарителях.
4. Методика и результаты теплотехнических испытаний компактного воздухоохладителя с внутренним микро-оребрением труб.

Достоверность и обоснованность, полученных автором результатов подтверждается: а) сопоставлением результатов расчета локальных КТО и градиентов давления с доступными экспериментальными данными; б) сопоставлением подобранных численным методом значений массовой скорости R22 с результатами ее определения по методикам А.А. Гоголина, Ю.В. Захарова, Е. Granryd; в) использованием современных средств измерения при выполнении экспериментов и оценкой погрешности косвенных измерений.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях аспирантов, докторантов и соискателей БГАРФ, Калининград 2013-2015г.; на Международных «Балтийских морских форумах», КГТУ, Калининград 2013-2017г; XI Международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе-2013», Калининград. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО КГТУ, а разработанные методики определения рабочих и оптимальных параметров при внутритрубном кипении хладагентов применялись

инженерами-проектировщиками компании ООО «Рефимпэкс» при подборе испарителей холодильных машин, что подтверждается актами и справками о внедрении.

Личный вклад. Автором проведен сбор, анализ и сопоставление доступных экспериментальных данных о КТО и градиентах давления с полученными расчетными данными; реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы совместного расчета КТО и падения давления в горизонтальных трубах и плоских змеевиках; осуществлен подбор оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров при кипении семи хладагентов в змеевиках, а также получены степенные зависимости с численными коэффициентами для практического определения оптимальной скорости или длины зоны кипения. Выполнено проектирование, монтаж и наладка экспериментальной установки, а также проведение экспериментов и обработка полученных экспериментальных данных.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы (14,37 п.л. /5,73 п.л.), в том числе в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ – 3; две программы для ЭВМ, разработанные в процессе исследования, прошли процедуру государственной регистрации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 213 страницах машинописного текста и содержит 44 рисунка, 22 таблицы и 15 приложений. Список литературных источников включает 147 наименований.

Специальность, которой соответствует диссертация. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.08.05 «Судовые энергетические установки (СЭУ) и их элементы (главные и вспомогательные)», так как испарители холодильных систем относятся к элементам вспомогательных установок, обеспечивающих функционирование судна (пункт 1 паспорта специальности). Исследуемые процессы внутритрубного кипения хладагента в испарителях согласно пункту 2.1 соответствуют рабочим процессам во вспомогательных элементах СЭУ. Кроме того, физические явления и теоретические основы кипения хладагентов такие же, как при кипении воды в судовых парогенераторах. Оптимизация параметров кипения хладагентов в трубах и плоских змеевиках способствует повышению энергоэффективности холодильных систем и снижению количества хладагента на судне, что согласно пункту 2.5 направлено на повышение экономичности СЭУ и защиту окружающей среды от загрязнения тепловыми выбросами и химическими веществами.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, оценена степень ее разработанности, поставлены цели и задачи работы, описаны объект, предмет и методы исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов, а также изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопроса, рассмотрены методы и выбраны методики расчета КТО и падения давления при кипении хладагентов в трубах. Показано, что сложность процессов кипения жидкости обусловлена изменением фазового состава смеси при ее движении в обогреваемой трубе. Установлено, что наиболее высокие КТО получаются при расслоено-волновом и кольцевом режимах потока. Рассмотрены особенности влияния калачей на перераспределение фаз и падение давления двухфазного потока. Собраны экспериментальные данные о локальных коэффициентах теплоотдачи и градиентах давления при кипении хладагента в гладких трубах и трубах с внутренним микро-оребрением. Приводится описание методик и критериев оптимизации. Структурная схема исследования представлена на рисунке 1.

Во второй главе представлены материалы разработки алгоритмов и компьютерных программ для расчета параметров кипения хладагентов по выбранным обобщенным методикам. Описана проведенная корректировка обобщенных методик.

Основу алгоритма составляют обобщенные методики расчета локальных КТО и градиентов давления в горизонтальных трубах. При подготовке методик обобщение экспериментальных данных осуществлялось с использованием показателей свойств хладагентов. Количество используемых показателей и их сочетания в разных методиках неодинаковы. Алгоритм предполагает определение искомых величин для змеевиков с числом труб от 2 до 20 с использованием 18 показателей термодинамических и теплофизических свойств хладагентов. К исходным данным наряду с видом хладагента отнесены: температура кипения t_0 , массовые паросодержания в начале x_n и на выходе x_b зоны кипения, внутренний диаметр труб d_T , их число n_T в змеевике, отношение радиуса калача R_k к диаметру трубы $z = R_k/d_T$, массовая скорость хладагента $w\rho$ и плотность теплового потока q . Для показателей свойств хладагентов по справочным данным сформирована электронная таблица, из которой удобно извлекать численные их значения, зависящие от вида хладагента и температуры насыщения t_s , изменяющейся в диапазоне от -50°C до $+35^\circ\text{C}$ с шагом $0,05^\circ\text{C}$.

Необходимость программирования обусловлена трудоемкостью пошаговых расчетов, большим количеством зависимых переменных и наличием ряда условных переходов. Корректировка используемых методик позволила распространить их на ламинарный и переходный режимы течения хладагента. Предложенный алгоритм направлен на совместный расчёт локальных и средних КТО по пяти методикам, а также локальных градиентов и полного падения давления по четырём методикам на основе общих исходных данных и единого массива с показателями свойств десяти хладагентов. Локальные значения вычисляются по коротким участкам, длина которых зависит от сочетания исходных данных.

Длина зоны кипения l_k на основе уравнения теплового баланса определяется по выражению:

$$l_k = w\rho \cdot d_T (i'' - i') \cdot (x_b - x_n) / (4q), \quad (1)$$



Рисунок 1 - Структурная схема исследования

где q - плотность теплового потока, отнесенная к внутренней поверхности труб.

В змеевиковом испарителе теплоприток к хладагенту происходит на прямых участках горизонтальных труб, так как калачи обычно находятся вне потока охлаждаемой среды. Это позволяет при определении КТО рассматривать змеевик как прямую обогреваемую трубу, длина зоны кипения l_k в которой определяется числом труб n_T и длиной l_T отдельных труб. Деление

труб на короткие участки осуществляется по приращениям паросодержания $\Delta x = (x_B - x_H)/n_y$ так, чтобы калачи оказывались на границе двух участков. (Рисунок 2) Поэтому число участков n_y зависит от числа труб n_T и калачей в змеевике.

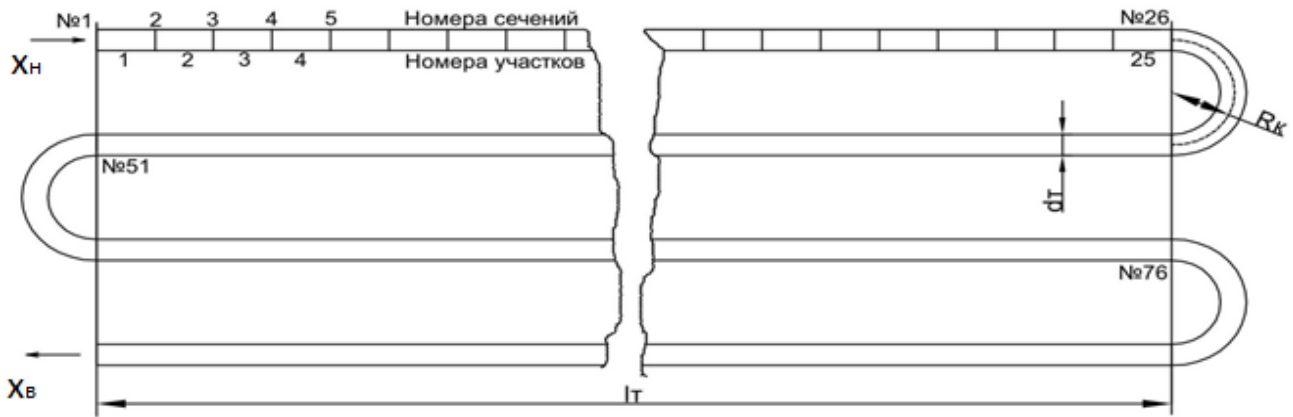


Рисунок 2 - Схема деления змеевика из четырех труб на участки

Входу и выходу очередного калача присваивается одинаковый номер. Четкая нумерация сечений змеевика важна также с позиций осреднения локальных значений КТО и градиента давления dP_T/dz . Падение давления происходит на коротких участках труб и в калачах. Поэтому приходится суммировать результаты, полученные в сечениях от второго до последнего, т.е. $n_{y0} = n_y \cdot n_T$.

Сначала была составлена программа для нахождения показателей кипения хладагента в горизонтальных трубах, а затем - общая программа для расчета КТО и градиента давления в змеевиках с числом труб от 2 до 20. Лист ввода и вывода данных показан на рисунке 3.

	A	C	D	E	F	G	I	J	K	L	
1	R410A	выберите XA					Исходные данные	2,930149679			
2	$t_0, ^\circ\text{C}$	X_H	X_B	$d_{T, \text{м}}$	n_T	$\text{wp, кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	R_k	Θ	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	z	
3	-40,00	0,2	0,99	0,012	20	76,63324	0,024	0	2000,0	2,0	
4	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	76,6	23,9	1351,2	2,90	11,0			
5				Результаты расчёта							
6											
7	Средние КТО, Вт/(м ² ·К)					Падения давления, Па					
8	Shah	GW	GWn	Kandlikar	Liu-W	Homohen	Gronnerud	Friedel	Muller		
9	1600,62	1294,26	1100,92	1431,17	1329,10	12810,0	13174,3	17489,2	16323,6		
10											
11	Ik	$\alpha_{ср}$	ΔP_n	$\Delta P_{пс}$	Fl	Q	It	$\alpha_{ср}/\Delta P_n$	Ga		
12	23,87	1351,21	21665,0	20290,7	1,72	1799,1	1,194	62,368	31,185		
13	Градиенты давления (средние)										
14	V	Δt	Homohen	Gronnerud	Friedel	Muller	It	wv			
15	4,462	2,90	535,76	550,38	731,65	682,66	1,4801	1,194	10,966		
16											
17	Вспомогательные расчёты										
18	$T_t - T_{02}$	2,93015									
19	$T_t - y \cdot dT$	3,245714		0,608815							
20											

Рисунок 3 - Вид окна пользователя

Основными результатами расчета являются значения найденных по разным методикам локальных КТО и градиентов давления, которые зависят от текущего паросодержания x , изменяющегося от x_H до x_B по выделенным участкам n_y , число которых составляет около 100.

Одновременно определяются падения давления на соответствующих калачах, а также потери давления, обусловленные ускорением двухфазного потока и нивелирным напором, вызванные гравитационными силами.

В алгоритм расчета заложены условные переходы, учитывающие изменение режима течения в зависимости от чисел Рейнольдса, а также расслоение двухфазного потока в зависимости от числа Фруда. Средний по каждой методике КТО находится путем деления суммы локальных его значений на число участков. Предусмотрено также осреднение КТО по пяти методикам. Полное падение давления в змеевике получается в виде произведения среднего градиента на длину зоны кипения, к которому добавляются потери, обусловленные ускорением потока и нивелирным напором, а также сумма падений давления во всех калачах.

В третьей главе представлено сопоставление результатов расчета по составленной программе с экспериментальными данными зарубежных исследователей о локальных КТО и градиентах давления. В доступных источниках удалось найти экспериментальные данные по хладагентам R404A, R410A, R134a, R507A, R407C и R717. Они представлены в виде графиков изменения значений локальных КТО и градиентов давления от паросодержания x . По каждому графику найдены средние значения α_s или $(dP/dz)_s$. По исходным данным каждого эксперимента определялись расчетные значения средних КТО α_p и градиентов давления $(dP/dz)_p$. Материалы сопоставления приводятся в приложениях к диссертации.

Для количественной оценки несовпадения результатов расчета с экспериментальными, используется ряд показателей: относительное отклонение каждого значения ε_i ; среднее отклонение их значений ε_c , полученных по данной методике; стандартное (среднеквадратичное) отклонение значений (СКО) σ и доверительный интервал «ди». Они определяются по формулам:

$$\varepsilon_i = (\alpha_{pi} - \alpha_{si}) / \alpha_{si}; \quad \varepsilon_c = \sum \varepsilon_i / n; \quad (2)$$

$$\sigma = [\sum (\varepsilon_i - \varepsilon_c)^2 / (n - 1)]^{0,5}; \quad (3)$$

$$\text{ди} = \pm t \cdot \sigma / \sqrt{n}, \quad (4)$$

где n – число сочетаний условий кипения хладагента при проведении экспериментов по определению локальных КТО; t - коэффициент Стьюдента; α_{pi} и α_{si} - средние значения КТО для каждого сочетания условий кипения, найденные расчетом по конкретной методике и снятые с графиков экспериментальных данных, соответственно.

Статистическая обработка полученных значений показала заметный разброс значений α_p/α_3 и $(dP/dz)_p/(dP/dz)_3$. Всего в анализ входило 271 значение средних КТО и 82 значения средних градиентов давления. По результатам анализа было решено исключить данные (промахи), не входящие в диапазон 3σ (тройного СКО). В таблице 1 приведены показатели точности КТО для шести хладагентов и градиента давления для четырех хладагентов.

Таблица 1 - Средние показатели точности расчета КТО и градиента давления

Показатели	Вид хладагента						
	R404A	R410A	R134a	R507	R407C	R717	По всем х/а
Определение КТО							
Число n	45	85	58	10	35	22	255
ε_c	0,103	-0,006	-0,166	-0,213	0,490	-0,035	0,0345
σ	0,2466	0,2944	0,2376	0,3429	0,2044	0,3117	0,3342
ди	0,0721	0,0626	0,0612	0,2125	0,0677	0,1303	0,041
Определение градиента давления							
Число n	-	52	16	4	4	-	76
ε_c	-	-0,089	0,096	0,113	0,342	-	-0,017
σ	-	0,1529	0,3431	0,1646	0,2379	-	0,2384
ди	-	0,0416	0,1681	0,1613	0,2331	-	0,0536

Установлено, что наилучшее совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными получается при определении КТО по пяти методикам под авторством Shah M.M. (1982), Gungor K.E., Winterton R.H.S. (1986) и (1987), Kandlikar S.G. (1990), Liu Z., Winterton R.H.S. (1991), а градиентов давления по методике Muller-Steinhagen (1986). При этом отношение $\alpha_p/\alpha_3 = 1,035$ и $\sigma = 0,3342$, а $(dP/dz)_p/(dP/dz)_3 = 0,983$ и $\sigma = 0,2384$.

После проверки достоверности результатов расчета локальных КТО и градиентов давления по обобщенным методикам, их корректировки и окончательного отбора методик, по разработанной программе были выполнены многовариантные расчеты, охватывающие широкий диапазон исходных данных и включающие 300-500 сочетаний конструктивных и режимных параметров при кипении каждого из семи рассмотренных хладагентов. Для получения зависимости среднего КТО α_{cp} и полного падения давления ΔP_n от семи варьируемых переменных использована классическая линейная модель множественной регрессии (КЛИМР). Наилучшее совпадение с результатами точного расчета по компьютерной программе обеспечивают уравнения в виде степенных зависимостей:

$$\alpha_{cp,y} = 10^{k_0} \cdot (w\rho)^{k_1} \cdot q^{k_2} \cdot x_H^{k_3} \cdot (x_B - x_H)^{k_4} \cdot n_T^{k_5} \cdot d_T^{k_6} \cdot (t_0 + 90^\circ)^{k_7}, \quad (5)$$

$$\Delta P_{n,y} = 10^{l_0} \cdot (w\rho)^{l_1} \cdot q^{l_2} \cdot x_H^{l_3} \cdot (x_B - x_H)^{l_4} \cdot n_T^{l_5} \cdot d_T^{l_6} \cdot (t_0 + 90^\circ)^{l_7}. \quad (6)$$

Численные значения показателей степени « K » и « L » приводятся в таблице 2.

Таблица 2 - Коэффициенты для расчета КТО $\alpha_{ср.у}$ и падения давления $\Delta P_{п.у}$

Хладагент	Переменная	Уравнение (5)							
		K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
R404	$\alpha_{ср.у}$	0,13482	1,05944	0,23118	0,08853	0,15891	0,13640	-0,05936	-0,06303
R410		0,80631	1,01628	0,17283	0,08478	0,15523	0,10104	-0,14880	-0,28927
R290		1,54736	0,76501	0,16172	0,05253	0,04616	0,03784	-0,00545	-0,12528
R507		0,13219	1,07916	0,21700	0,05507	0,07566	0,13553	-0,06511	-0,09353
R22		-0,00108	1,03562	0,24039	0,08056	0,08026	0,14005	-0,05908	0,02342
R134a		0,21985	1,21476	0,27827	0,08556	0,15344	0,13376	-0,16752	-0,46312
R407C		0,10425	1,07810	0,21078	0,08196	0,09290	0,13664	-0,04770	0,01514
Хладагент	Переменная	Уравнение (6)							
		L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
R404	$\Delta P_{п.у}$	6,299742	2,502118	-0,7699	0,153343	1,30204	0,171212	-0,21342	-2,71648
R410		6,074311	2,437552	-0,7272	0,107663	1,005244	0,186888	-0,15469	-2,52977
R290		6,802689	2,627757	-0,8241	0,176147	1,251775	0,136092	-0,14137	-2,54036
R507		6,200923	2,483807	-0,7599	0,138389	1,265051	0,158046	-0,2039	-2,67354
R22		6,378998	2,455844	-0,7522	0,146757	1,258927	0,159266	-0,2054	-2,60669
R134a		7,739218	2,54556	-0,7854	0,161625	1,255607	0,140023	-0,16313	-3,21051
R407C		6,942948	2,495249	-0,7730	0,149339	1,267521	0,162368	-0,21064	-2,88474

При использовании уравнений регрессии (5) и (6) следует учитывать, что изменение любой варьируемой величины так или иначе влияет на все искомые переменные.

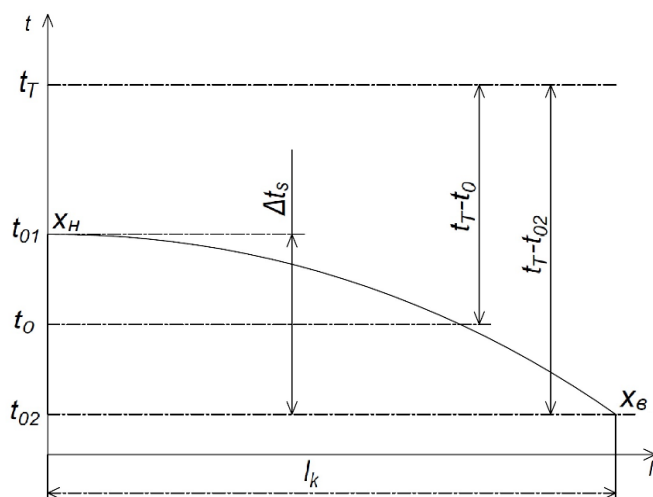
В четвертой главе рассмотрено влияние основных факторов на показатель внешней необратимости процесса. Выполнен подбор оптимальных и регрессионный анализ расчетных значений массовой скорости и длины испарительного участка, а также приведены рекомендации по вводу ограничений на исходные данные.

Оптимизация параметров на стороне кипящего в трубах хладагента направлена на уменьшение необратимых потерь в испарителе и снижение падения давления в нем. В качестве критерия оптимальности принимается минимум разности между средней температурой внутренней стенки труб t_T и температурой хладагента t_{o2} на выходе из зоны кипения (Рисунок 4). Разность между средними температурами внутренней стенки труб t_T и кипящего хладагента t_o зависит от плотности теплового потока q и среднего КТО α_a . Ее можно выразить как $t_T - t_o = q/\alpha_a$. Падение давления в трубах сопровождается понижением температуры насыщения хладагента Δt_s от t_{o1} на входе до t_{o2} на выходе из зоны кипения: $\Delta t_s = t_{o1} - t_{o2}$. Оптимальный режим работы

достигается при минимуме обеих разностей. Разность $t_T - t_{o2}$ можно представить в виде:

$$t_T - t_{o2} = q/\alpha_a + y \cdot \Delta t_s. \quad (7)$$

Множитель «у» учитывает характер понижения температуры кипения по ходу движения хладагента.



С использованием программы для ЭВМ произведен подбор оптимальной скорости $(w\rho)_0$ и длины зоны кипения $l_{ко}$ для хладагентов R404A, R410A, R290, R507, R22, R134a и R407C при разных сочетаниях исходных данных: d_T , t_0 , x_H , q или Q_3 . Число неповторяющихся сочетаний исходных данных для каждого хладагента достигало: 470 для $(w\rho)_0$ и 450 для $l_{ко}$.

Рисунки 4 – График изменения температур n_T и ориентация змеевика слабо влияют на искомую длину $l_{ко}$. Расчёты показали, что число труб n_T и ориентация змеевика слабо влияют на искомую длину $l_{ко}$.

Наиболее подходящей для аппроксимации оказались степенные зависимости вида:

$$(w\rho)_0 = 10^{a_0} \cdot q^{a_1} \cdot d_T^{a_2} \cdot (t_0 + 90)^{a_3} \cdot x_H^{a_4}. \quad (8)$$

$$l_{ко} = 10^{b_0} \cdot Q_3^{b_1} \cdot d_T^{b_2} \cdot x_H^{b_3} (t_0 + 90)^{b_4}. \quad (9)$$

Для зависимостей (8), (9) найдены коэффициенты $a_0 \dots a_4$, $b_0 \dots b_4$ и показатели точности: коэффициент определения r^2 и стандартная ошибка se_y для семи хладагентов (Таблица 3). Эти уравнения в инженерной практике позволяют находить оптимальные значения $(w\rho)_0$ и $l_{ко}$ без использования программы по конкретным исходным данным. Аналогичные зависимости, но с другими коэффициентами нетрудно получить для расчета $\alpha_{ср}$ и ΔP при условиях, для которых найдены $(w\rho)_0$ или $l_{ко}$.

Сопоставление оптимальной скорости $(w\rho)_0$, полученной по двум методикам оптимизации, и численным методом показано в таблице 4. При $t_0 = 0^\circ\text{C}$ скорости $(w\rho)_0$, найденные по методикам Гоголина и Захарова, несколько превышают подобранные их значения, приведенные в нижней строке. Когда $t_0 = -30^\circ\text{C}$, скорости $(w\rho)_0$ по данным Гоголина оказались заметно ниже подобранных значений. Оптимальные скорости $w\rho$ с понижением температуры t_0 уменьшаются по всем методикам. Более резкое их изменение по методике Гоголина можно объяснить использованием в ней упрощённых формул для определения среднего коэффициента теплоотдачи α_a .

Таблица 3 - Коэффициенты для подбора оптимальной скорости $(w\rho)_0$ и длины $l_{к0}$

Хладагент	Переменная	Уравнение (8)					Точность	
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	r_2	se_y
R404	$w\rho$	-0,56155	0,331340	0,107856	0,927805	0,026957	0,929181	0,042376
R410		-0,93179	0,357174	0,044701	1,006704	0,021959	0,965928	0,030247
R290		-1,18100	0,384746	0,166022	1,039929	-0,02339	0,9143121	0,055334
R507		-1,03941	0,358093	0,050608	1,095507	0,007369	0,9743349	0,028258
R22		-1,21615	0,377104	0,105878	1,155761	0,013268	0,9279647	0,051315
R134a		-2,07476	0,386910	0,16491	1,612234	0,001946	0,9651882	0,044369
R407C		1,127279	0,103017	0,441154	-1,38394	-0,00032	0,950176	0,044813
Хладагент	Переменная	Уравнение (9)						
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	r_2	se_y
R404	l_k	7,739485	-1,17562	3,452007	-0,34029	2,184998	0,9592148	0,062498
R410		7,942196	-1,16517	3,453571	-0,34464	2,161622	0,9667070	0,056904
R290		8,003369	-1,203537	3,516382	-0,34257	2,196835	0,9548798	0,067829
R507		7,700551	-1,13681	3,381965	-0,36417	2,05781	0,9529347	0,065896
R22		7,841163	-1,23134	3,566147	-0,35578	2,32884	0,9594016	0,064610
R134a		7,618369	-1,37611	3,801679	-0,36652	2,820096	0,887942	0,121716
R407C		6,659805	-1,10391	3,050404	-0,19681	2,26687	0,791869	0,116265

Причиной такого превышения может служить и то, что в упомянутых методиках есть лишь упоминание о калачах, а падение давления в них отдельно не рассматривается. Используется фиксированный коэффициент сопротивления трению, который должен учитывать все составляющие падения давления потока.

Таблица 4 - Оптимальная скорость R22 по двум методикам

Параметры	Методика Гоголина						Методика Захарова					
	0			-30			0			0		
$t_0, ^\circ\text{C}$	0			-30			0			0		
$x_n; d_T, \text{м}$	0,15; 0,017			0; 0,017			0,15; 0,01			0,15; 0,02		
$q, \text{Вт/м}^2$	2000	5000	10000	2000	5000	10000	2000	5000	10000	2000	5000	10000
$(w\rho)_0$	140	202	280	57	90	122	125	190	240	140	217	280
$(w\rho)_0, \text{числ.}$	132	172	206	81	116	140	114	171	240	121	181	253

Используя множитель $y = 0,6$ в формуле (7) Granrud получил простую формулу для определения оптимальной длины зоны кипения $l_{к0}$ шести хладагентов, включая три озоноразрушающих. При выводе её принят упрощённый подход к расчёту КТО и падения давления хладагента. Так, полный коэффициент трения считается постоянным и равным 0,2 - 0,3, а массовая скорость $w\rho$ в явном виде не используется. Тем не менее, для

приведённого в описании методики примера, относящегося к кипению R22, длина $l_{ко}$, найденная по обсуждаемой формуле, практически совпала с подобранной численным методом длиной.

С применением разработанного подхода к определению оптимальных параметров работы испарителя, был проведен расчет холодопроизводительности Q_0 мясной холодильной камеры УПС «Крузенштерн» с использованием подобранных оптимальных параметров кипения хладагента. В качестве исходных данных принимались: хладагент R22; температура кипения $t_0 = -20^\circ\text{C}$; температура конденсации $t_k = 37^\circ\text{C}$; внутренний диаметр труб $d_T = 10$ мм; количество змеевиков $n_z = 5$; количество труб в змеевике $n_T = 8$; длина одной трубы $l_T = 1500$. Расчет показал повышение Q_0 на 10% по сравнению с проектной $Q_{0п} = 6637$ Вт. При минимальной разности $t_T - t_{02}$ подобранная Q_0 составила 7307 Вт.

В пятой главе описана экспериментальная установка для испытаний воздухоохладителя с кипением R410A в змеевиках; приводятся результаты характерных опытов; рассмотрены особенности определения КТО и градиента давления в трубах с микро-оребрением. В качестве объекта исследования выбран трубчато-пластинчатый воздухоохладитель (ВО) канального типа, который входит в состав полупромышленного кондиционера Mitsubishi Zubadan холодопроизводительностью 7,1 кВт. Другой кондиционер такого же типа служит для создания тепловой нагрузки на испытуемый ВО и стабилизации температуры воздуха в помещении с компрессорно-конденсаторными блоками обоих кондиционеров. Основное оборудование установки располагается в трех смежных помещениях, соединенных посредством воздухопроводов с клапанами для перераспределения потоков воздуха. Каждое помещение оснащено приточно-вытяжной вентиляцией и управляемыми электронагревателями. В помещениях с внутренним (ВБ) и наружным (НБ) блоками основного кондиционера установлены ультразвуковые увлажнители. В целях определения коэффициента теплопередачи (КТП) и гидравлического сопротивления ВО предусмотрена система измерений с большим количеством измерительных преобразователей и приборов. Преимущественно используются измерительные преобразователи (датчики) с электрическим выходным сигналом. Упрощенная схема измерений и циркуляции хладагента показана на рисунке 5. На ней приведены буквенные обозначения основных датчиков: Т- температуры, Р- давления, F- расхода, S- скорости, М- влажности, D- плотности, L- уровня конденсата в мерной колбе. Буквой М в окружности обозначен электропривод. Одновременное измерение расхода F, плотности D и температуры T хладагента обеспечивает массовый расходомер Optimass 6400С. Температура хладагента измерялась с точностью $\pm 0,15^\circ\text{C}$, давление по циклу с точностью ± 16 кПа, падение давления в змеевике ± 2 кПа и расход хладагента $\pm 0,13$ кг/ч.

Особенности холодильной машины обусловлены наличием ресивера-теплообменника РТО и двух электронных регулирующих вентилей (ЭРВ). ЭРВ «А» обеспечивает некоторое переохлаждение жидкости в конденсаторе КД

(точка 3 на рисунке 6), а ЭРВ «В» поддерживает небольшой перегрев пара на входе в спиральный компрессор КМ (точка 1 в цикле ХМ). В РТО происходит

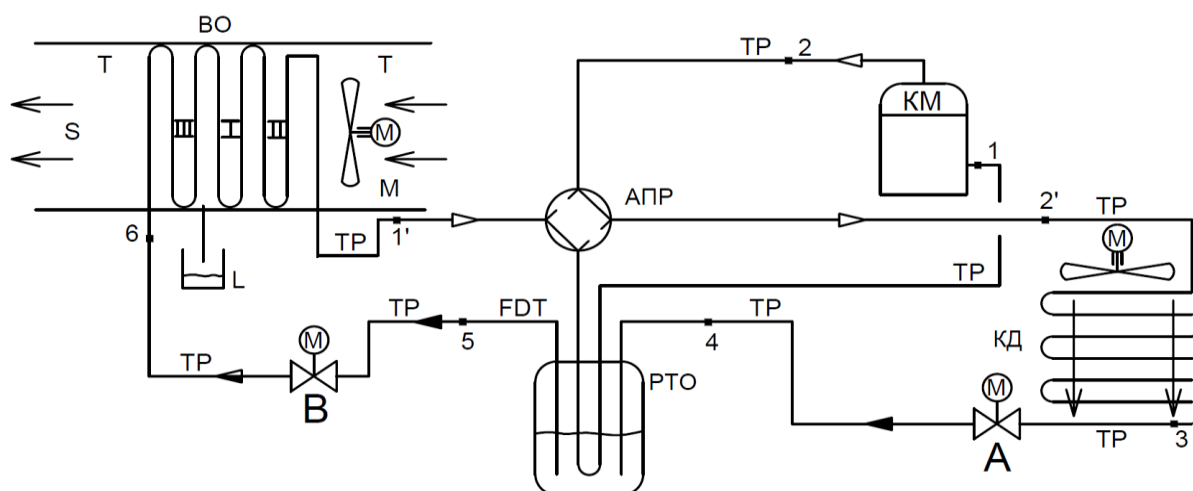


Рисунок 5 - Упрощенная схема системы измерения

докипание отсасываемого по U - образной трубе компрессором пара и конденсации пара, образующегося при дросселировании жидкости в ЭРВ «А». Насыщенная жидкость состояния 5 дросселируется в ЭРВ «В». Как показали измерения, из ВО выходит практически насыщенный пар, что свидетельствует о кипении хладагента по всей длине змеевиков, т.е. об отсутствии зоны перегрева пара.

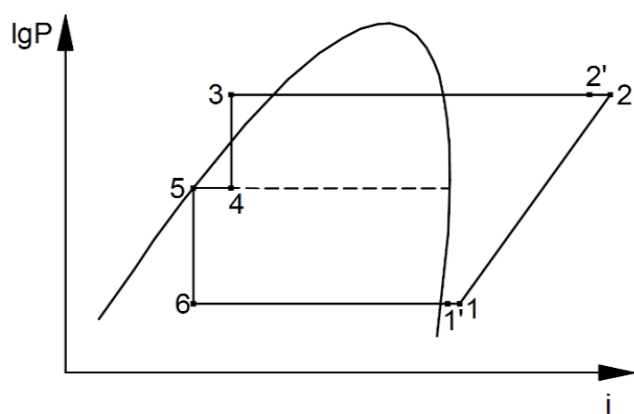


Рисунок 6 - Цикл холодильной машины хладагента. Такое оребрение выполняется в виде спиральных канавок, но его параметры остаются неизвестными. КТП ВО можно относить к площади наружной или внутренней его поверхности. Из-за трудностей измерения обеих площадей коэффициент K_H по результатам опытов отнесен к площади F_H наружной поверхности с плоскими ребрами. Использована формула:

$$K_H = Q_0 / (F_H \cdot \theta_T) = 1 / [1 / (\alpha_B E_H \xi) + \beta \cdot \delta_3 / \lambda_3 + \beta / \alpha_a]. \quad (10)$$

Вторая часть этой формулы позволяет находить КТП по данным о КТО на стороне воздуха α_B и хладагента α_a . При использовании первой ее части

холодопроизводительность Q_0 определялась путем осреднения значений, найденных по тепловому балансу на стороне хладагента и воздуха. Средний логарифмический температурный напор θ_T находился с учетом понижения температур по ходу движения как воздуха, так и кипящего хладагента.

Условия испытаний ВО продолжительностью от 5 до 9 часов характеризуются параметрами: температура охлаждаемого воздуха $t_B = 24,6 \dots 30,8^\circ\text{C}$, относительная влажность $\varphi_1 = 18,5 \dots 49,6\%$, температура кипения хладагента $t_0 = 4,2 \dots 11,3^\circ\text{C}$, массовый его расход $Ga = 140,2 \dots 221,3$ кг/ч. На их основе для 20 установившихся режимов получены значения холодопроизводительности $Q_0 = 7120,3 \dots 10699,3$ Вт и коэффициента теплопередачи $K_H = 52,4 \dots 75,5$ Вт/(м² · К). КТП оказался выше значений, рассчитанных по методикам для ВО с гладкими внутри трубами и плоскими снаружи ребрами. Падение давления хладагента в трех змеевиках при указанных выше условиях испытаний составило 12,4 ... 55,2 кПа.

Внутреннее микро-оребрение труб в виде спиральных канавок повышает интенсивность теплоотдачи при умеренном повышении гидравлического сопротивления. С 1977 года оно находит расширяющееся применение в теплообменных аппаратах. Многообразие параметров микро-оребрения труб увеличивает объем экспериментальных исследований, затрудняет сравнение опытных данных и получение расчетных зависимостей. Опубликованные методики расчета, как правило, основаны на сравнительно небольших массивах экспериментальных данных. Чтобы охватить трубы с разными параметрами микро-оребрения, в расчетах используют площадь их проходного (живого) сечения, гидравлический диаметр и площадь внутренней поверхности, приходящуюся на один метр длины.

Выполненный анализ позволил выбрать две методики для определения КТО: Ding (2008), Wu (2013); и четыре методики для определения градиента давления при кипении хладагентов в микро-оребрённых трубах: Choi (2001), Ding (2009), Goto (2001), Olivier (2004). Сопоставление результатов расчета с опубликованными экспериментальными данными показало целесообразность осреднения результатов этих двух методик для КТО и четырех методик для градиента давления. При этом для 181 сочетания сравниваемых КТО получено $\varepsilon_c = -0,1313$ и $\sigma = 0,274$, а для 91 сочетаний градиента $\varepsilon_c = -0,0577$ и $\sigma = 0,247$. Применительно к условиям, соответствующим $Q_0 = 7120,3$ Вт и $Q_0 = 10699,3$ Вт учет микрооребрения повышает расчетный КТО в 1,98 и 1,87 раз, а градиент давления в 1,65 и 1,69 раз относительно их значений в гладких трубах. Эффективность микрооребрения E характеризуют отношением приращений КТО и градиентов давлений. Из приведенных цифр следует $E = 1,2$ и $1,11$. Характерно, что с ростом плотности теплового потока и массовой скорости хладагента эффективность микрооребрения понижается.

Заключение. В процессе диссертационного исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Выявлены наиболее перспективные методики расчета локальных КТО и градиентов давления; произведена их корректировка, учитывающая

изменение режимов течения хладагента от турбулентного к переходному и ламинарному.

2. Предложена расчетная схема деления плоских змеевиков с разным числом горизонтальных труб на короткие участки, позволяющая находить падение давления в калачах с использованием параметров хладагента на входе в каждый из них.
3. Разработаны объединенные алгоритмы пошагового расчета локальных КТО по пяти обобщенным методикам и градиентов давления по четырем методикам при кипении хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках; предусмотрено определение среднего КТО и полного падения давления на основе соответствующих методик.
4. Составлены удобные для пользователей две компьютерные программы, выполняющие совместный расчет показателей интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении 10 хладагентов: а) в горизонтальных трубах; б) в плоских змеевиках; возможно изменение перечня рассматриваемых хладагентов.
5. На основе сопоставления результатов расчета с доступными экспериментальными данными зарубежных исследователей установлено, что отношение расчетных и экспериментальных данных приближается к единице, а стандартное отклонение становится минимальным, если средний КТО находится путем осреднения результатов расчета по пяти используемым методикам, а градиент давления - по методике Мюллера - Стейнхагена.
6. По итогам многовариантных расчётов с использованием компьютерной программы проведён анализ влияния различных факторов на показатели кипения хладагентов и получены уравнения для инженерного расчёта среднего КТО и полного падения давления семи хладагентов в змеевиковых испарителях при разных сочетаниях исходных данных.
7. Обоснована целесообразность применения численного метода определения оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров змеевиковых испарителей; выполнен подбор оптимальных значений массовой скорости $(w\rho)_o$ и оптимальной длины зоны кипения $l_{ко}$ для семи хладагентов в широком диапазоне условий их кипения. Регрессионный анализ результатов подбора позволил получить степенные зависимости для инженерного расчета $(w\rho)_o$ и $l_{ко}$ по условиям кипения выбранного хладагента; предложено не использовать сочетания исходных данных, в которых понижение температуры насыщения хладагента Δt_s и/или разность $t_T - t_{02}$ превышает 3°C .
8. Создана экспериментальная установка для теплотехнических испытаний ХМ с компактным воздухоохладителем (ВО); ввиду наличия внутреннего микроорегбрения труб и тисненных пластин наружного оребрения, падение давления хладагента в змеевиках и коэффициент теплопередачи, отнесенный к наружной поверхности теплообмена, оказались выше значений, найденных по методикам для гладких труб.

9. Выполнен анализ десяти методик определения локальных КТО и градиентов давления при кипении хладагентов в микро-оребрённых трубах; приемлемое совпадение результатов расчета с доступными экспериментальными данными достигается в случае, когда КТО осредняется по двум методикам, а градиент давления - по четырем методикам.

Последующие исследования следует направить на: а) получение и накопление экспериментальных данных о локальных КТО и градиентах давления при кипении перспективных хладагентов как в гладких, так и в микро-оребрённых трубах; б) совершенствование методик расчета КТО и падения давления хладагентов при низких температурах кипения и невысоких плотностях теплового потока, которые характерны для судовых ХМ; в) практическое достижение оптимальных параметров внутритрубного кипения хладагентов при проектировании новых, подборе готовых и эксплуатации существующих испарителей.

Основное содержание и результаты исследования отражены в следующих публикациях:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кошелев, С.В. Оптимизация массовой скорости хладагента в трубах испарителей судовых установок / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс, М.Ю. Никишин // Эксплуатация морского транспорта. - 2017. - № 1. - С. 55-64. (0,56 п.л. /0,19 п.л.)
2. Кошелев, С.В. Учет ограничений при оптимизации параметров внутритрубного кипения хладагентов в судовых испарителях / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №4(44). - С. 795-805. (0,75 п.л. /0,38 п.л.)
3. Кошелев, С.В. Определение недостающих параметров внутреннего микро-оребрения труб при кипении хладагентов в судовых испарителях/ С.В. Кошелев// Морские интеллектуальные технологии. – 2018. - №4(42), т.3 – С. 76-82. (**Web of Science**) (0,38 п.л. /0,38 п.л.)

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

4. Кошелев С.В., Ейдеюс А.И., Анищенко А.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610039. «Расчет коэффициентов теплоотдачи по разным методикам при кипении хладагента в горизонтальных трубах». Правообладатель КГТУ. Заявка №2014619009 от 5.09.2014. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2015 г.
5. Ейдеюс А.И., Кошелев С.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015663262. «Общая программа расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении десяти хладагентов в плоских змеевиках с разным числом труб». Правообладатель КГТУ. Заявка №2015617969 от 31.08.2015. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14.12.2015 г.

Научные статьи, опубликованные в международных и российских журналах:

6. Ейдеюс, А.И. Потери давления на трение при кипении хладагента в трубах/ А.И. Ейдеюс, М.Ю. Никишин, С.В. Кошелев // Вестник Международной академии холода. - 2014. - № 1. - С. 64-67. (0,75 п.л. /0,25 п.л.)
7. Ейдеюс, А.И. Сравнение интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении хладагентов R404A и R22 в горизонтальных трубах/ А.И. Ейдеюс, М.Ю. Никишин, С.В. Кошелев // Вестник Международной академии холода. - 2015. - № 1. - С. 69-74. (0,75 п.л. /0,25 п.л.)
8. Ейдеюс, А.И. Падение давления в змеевиковых испарителях и производительность компрессора/ А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев, М.Ю. Никишин // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. - №5. - С.12-18. (0,44 п.л. /0,15 п.л.)
9. Ейдеюс, А.И. Теплоотдача и падение давления при кипении хладагентов в змеевиках / А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев, М.Ю. Никишин // Вестник Международной академии холода. - 2016. - № 2. - С. 42-47. (0,88 п.л. /0,29 п.л.)
10. Кошелев, С.В. Влияние условий внутритрубного кипения хладагентов на внешнюю необратимость в испарителях/ С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс, М.Ю. Никишин // Известия КГТУ. - 2016. - №42. - С. 117-125. (0,56 п.л. /0,19 п.л.)
11. Ейдеюс, А.И. Особенности определения эффективности трубчато-пластинчатых поверхностей теплообмена/ А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев, Ю.Н. Сластухин // Известия КГТУ. - 2018. - №48. - С. 90-99. (0,63 п.л. /0,21 п.л.)
12. Кошелев, С.В. Падение давления хладагента R410a в змеевиках воздухоохладителя с внутренним микрооребрением/ С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс, Ю.Н. Сластухин // Вестник Международной академии холода. - 2018. - №3. – С. 4-13. (1,25 п.л. /0,42 п.л.)

Статьи в сборниках научных трудов и тезисы докладов на научных конференциях:

13. Ейдеюс, А.И. Теплоотдача и падение давления хладагента R404A при кипении в горизонтальных трубах [Электронный ресурс] / А.И. Ейдеюс, М.Ю. Никишин, С.В. Кошелев // II Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2014. - С. 154-166. (0,75 п.л. /0,25 п.л.)
14. Кошелев, С.В. Падение давления кипящего хладагента в калачах воздухоохладителей [Электронный ресурс] / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // II Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2014. - С. 167-176. (0,75 п.л. /0,38 п.л.)
15. Ейдеюс, А.И. Программа расчета коэффициентов теплоотдачи и падения давления при кипении альтернативных хладагентов в горизонтальных трубах [Электронный ресурс] / А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев // III Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. - С. 250-262. (0,81 п.л. /0,41 п.л.)
16. Кошелев, В.Л. Разработка «Центра для испытаний реверсивной холодильной установки в широком диапазоне температур воздуха» [Электронный ресурс]

- / В.Л. Кошелев, Е.Д. Данилов, С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // III Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. С. 269-277. (0,63 п.л. /0,16 п.л.)
17. Ейдеюс, А.И. Необратимые потери при кипении хладагентов в змеевиковых испарителях [Электронный ресурс] / А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев, М.Ю. Никишин // IV Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 289-297. (0,5 п.л. /0,17 п.л.)
18. Кошелев, С.В. Оптимизация параметров на стороне кипящего в трубах хладагента [Электронный ресурс] / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // IV Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 309-315. (0,5 п.л. /0,25 п.л.)
19. Ейдеюс, А.И. Подбор рациональной длины труб змеевиковых испарителей с учетом вида и условий кипения хладагента [Электронный ресурс] / А.И. Ейдеюс, С.В. Кошелев // V Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. С. 309-318. (0,63 п.л. /0,31 п.л.)
20. Кошелев, С.В. Испытания интенсифицированного воздухоохладителя в составе холодильной машины с ресивером-теплообменником [Электронный ресурс] / С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс // V Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. С. 341-350. (0,56 п.л. /0,28 п.л.)

Кошелев Сергей Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ
МАШИН ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ
ХЛАДАГЕНТА В ИСПАРИТЕЛЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ .2019 г.

Формат 60x90 1/16.

Печать офсетная. Объем – 1,3 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ _____.

Издательство БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»
236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6