

ВрИО проректора по научной работе

Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения

высшего образования

«Московский государственный университет

пищевых производств»


Кухтенкова Наталья Ивановна

«06» «» 20  г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кошелева Сергея Валерьевича «Повышение энергоэффективности судовых холодильных машин путем выбора рациональных режимов кипения хладагента в испарителях», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)».

Актуальность темы

Холодильные машины (ХМ), применяются на морских судах повсеместно. К ним можно отнести: холодильно-морозильные комплексы на добывающих и обрабатывающих судах, установки охлаждения грузовых помещений, системы предварительного охлаждения рыбы, установки технологических потребителей для хранения рыбной муки и консервов, установки для провизионных кладовых, системы комфортного кондиционирования воздуха, системы технического кондиционирования на танкерах, установки для стабилизации параметров радиоэлектронной

аппаратуры на кораблях и исследовательских судах. Без ХМ невозможно функционирование судов, занятых добычей, переработкой, хранением и транспортировкой морепродуктов, конденсацией и транспортировкой сжиженных газов.

В связи с неизбежным переходом на новые хладагенты по требованиям экологии возникла необходимость в разработке современных методов теплового и гидромеханического расчёта испарителей. С учетом большой трудоемкости и высокой стоимости экспериментального определения локальных коэффициентов теплоотдачи и градиентов давления при кипении жидкостей в обогреваемых трубах представляются перспективными обобщённые методики, базирующиеся на опытных данных по кипению разных хладагентов в неодинаковых условиях.

Существующие методики определения оптимальной скорости хладагента в трубах испарителей распространяются лишь на традиционные хладагенты (R22, R12 и некоторые другие). Они получены с использованием приближенных формул расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления. Их нельзя использовать при переходе на новые хладагенты.

Подбор оптимальных сочетаний конструктивных и режимных параметров на стороне хладагента повышает эффективность холодильных систем. При большом суммарном потреблении энергии многочисленными холодильными машинами оптимизация их параметров необходима с позиций как экономии энергоресурсов, так и снижения загрязнения окружающей среды тепловыми и иными выбросами.

С учетом вышеизложенного, тема диссертации, посвященная исследованию методов определения параметров, характеризующих интенсивность процесса теплообмена при кипении хладагентов в змеевиковых теплообменниках, является актуальной.

Научная новизна исследования

Автором в диссертационной работе представлены следующие научные положения, которые имеют научное и практическое значение:

- Разработаны и реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы совместного расчета интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках, основанные на ряде обобщенных методик зарубежных исследователей и отличающиеся от них использованием разных формул в турбулентном, переходном и ламинарном режимах течения жидкой и паровой фаз.

- На основе сопоставления результатов расчета с доступными экспериментальными данными установлено, что наилучшее их совпадение достигается, если находить средний КТО путем осреднения результатов его расчета по пяти обобщенным методикам, а падение давления - по одной методике Мюллера-Стейнхагена.

- Путем регрессионного анализа результатов многовариантных расчетов для семи хладагентов получены степенные зависимости, по которым при выбранных исходных данных легко найти значения КТО и падения давления в плоских змеевиках без использования программы для ЭВМ.

- Предложено находить оптимальные сочетания конструктивных и режимных параметров кипения хладагентов в змеевиковых испарителях численным методом, который в отличие от аналитического метода не требует дифференцирования исследуемой функции при поиске ее экстремума и позволяет включать в математическую модель испарителей сложные и нелинейные уравнения.

- Получены степенные зависимости с численными коэффициентами для практического определения оптимальной скорости $(w_p)_o$ при известной плотности теплового потока q или длины зоны кипения $l_{ко}$ при известной тепловой нагрузке на змеевик Q_3 в зависимости от условий кипения пяти хладагентов.

Практическая значимость

Диссертационная работа носит прикладной характер. Практическая ее ценность заключается в подготовке методики определения оптимальных сочетаний массовой скорости и плотности теплового потока при кипении разных хладагентов в плоских змеевиках. Подбор оптимальных сочетаний режимных и конструктивных параметров осуществляется с использованием составленной программы для ЭВМ.

Показана возможность подбора оптимальной длины труб змеевика в зависимости от тепловой его нагрузки при заданных условиях кипения выбранного хладагента с использованием модифицированного варианта составленной программы для ЭВМ. Путем обобщения результатов подбора получены степенные зависимости, позволяющие находить оптимальную массовую скорость w_{p_0} и длину испарительного участка $l_{к0}$ при кипении семи хладагентов в широком диапазоне исходных данных. Значения оптимальной длины змеевиков целесообразно использовать при решении вопроса о количестве одинаковых змеевиков в проектируемом испарителе.

Оптимизация как массовой скорости хладагента, так и общей длины труб змеевика направлена на снижение необратимых потерь в испарителе. Это способствует повышению энергоэффективности и конкурентоспособности холодильных систем. Данные об оптимальных параметрах кипения хладагентов в змеевиковых испарителях необходимы для выбора рациональных режимов работы ХМ в процессе их эксплуатации.

Самостоятельное значение имеют компьютерные программы для расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении разных хладагентов в горизонтальных трубах и плоских змеевиках с числом труб от 2 до 20. На обе программы получены свидетельства о государственной регистрации. Востребованность этих программ будет возрастать по мере перехода на новые хладагенты, это неизбежно и определено

международными соглашениями. Кроме того, создана экспериментальная установка и проведены теплотехнические испытания при кипении хладагента R410A в испарителе с внутренним оребрением труб. Разработанная, для экспериментальной установки, система измерения позволяет проводить широкий спектр испытаний трубчато-пластинчатых теплообменников при кипении в них хладагента, что является большим заделом на дальнейшие исследования.

Достоверность и обоснованность научных результатов

Достоверность и обоснованность полученных автором результатов подтверждается:

- сопоставлением результатов расчета локальных КТО и градиентов давления с доступными экспериментальными данными;
- сопоставлением подобранных числовым методом значений массовой скорости R22 с результатами ее определения по методикам А.А. Гоголина, Ю.В. Захарова, Е. Granrud;
- использованием современных средств измерения при выполнении экспериментов и оценкой погрешности косвенных измерений.
- выступлением автора с докладами по теме диссертации на различных конференциях регионального и международного масштаба.

Оценка структуры и содержания работы

Представленная на отзыв 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, в том числе 90 зарубежных авторов.

Рецензируемая диссертационная работа оформлена качественно, написана технически грамотным языком, доступным для понимания и дает представление о ее научной новизне, практической значимости, личном

участии соискателя в получении и обоснованности приведенных теоретических и экспериментальных результатов.

Основное содержание диссертационной работы

Автореферат включает в себя основные положения диссертационной работы, дает полное представление о работе в целом. Диссертация и автореферат создают хорошее впечатление.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния вопроса, рассмотрены методы и выбраны методики расчета КТО и падения давления при кипении хладагентов в трубах. Для расчета КТО автор выбрал методики 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 для расчета падения давления - гомогенную модель (Кутепов А.А.) (1986) и методики Gronnerud R. (1972), Friedel L. (1979) и Muller-Steinhagen H., Heck K. (1986). Показано, что сложность процессов кипения жидкости обусловлена изменением фазового состояния 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. Из опубликованных в ведущих мировых изданиях источников собраны экспериментальные данные о локальных коэффициентах теплоотдачи и градиентах давления при кипении хладагентов в технически гладких трубах и трубах с внутренним микро-оребрением. Приведено описание методик и критериев оптимизации. Представлена структурная схема исследования.

Вторая глава диссертации посвящена разработке алгоритма расчета локальных КТО и градиентов давления в горизонтальных трубах на основании выбранных обобщенных методик. После анализа и отбора избранных методик, автор разработал алгоритм совместного тепло-гидравлического расчета КТО и падения давления хладагента в

горизонтальной трубе, а затем – в плоском змеевике, который предполагает определение искомых величин для змеевиков с числом труб от 2 до 20 с использованием 18 показателей термодинамических и теплофизических свойств хладагентов. Показатели свойств хладагентов сформированы в виде электронной таблицы, из которой извлекаются численные значения, зависящие от вида хладагента и температуры насыщения, изменяющейся в диапазоне от минус 50°C до 35°C с шагом $0,05^{\circ}\text{C}$. Разработанные автором алгоритмы совместного расчета локальных и средних значений КТО, а также локальных градиентов и полного падения давления на основе общих исходных данных и единого массива с показателями свойств десяти хладагентов позволили распространить методики на ламинарный и переходный режим течения хладагента.

Ввиду трудоемкости расчетов и наличия в методиках ряда условных переходов, автором были разработаны компьютерные программы, ускоряющие процесс расчета КТО и падения давления по упомянутому алгоритму. Первой была создана программа для расчета искомых параметров при кипении хладагента в гладких трубах теплообменников, а затем при кипении хладагента в змеевиках, состоящих из труб и колен (калачей). Данный тип испарителя находят повсеместное применение в холодильной технике и судовых холодильных установках.

В третьей главе автором выполнено сопоставление экспериментальных данных зарубежных исследователей, полученных из доступных источников, с собственными расчетными данными, полученными при тех же исходных условиях с использованием разработанных компьютерных программ. Автором были собраны экспериментальные значения КТО и градиентов давления для шести хладагентов: R404A, R410A, R134a, R507A, R407C, R717. Степень совпадения результатов расчета с экспериментальными данными представлена в таблице показателей точности по КТО для шести хладагентов, а по градиенту давления для четырех хладагентов. После проверки достоверности результатов расчета локальных

КТО и градиента давления, были выполнены многовариантные расчеты с использованием классической линейной модели множественной регрессии, автором получены зависимости среднего КТО $\alpha_{\text{ср}}$ и полного падения давления $\Delta P_{\text{п}}$ от семи варьируемых переменных с использованием двух подходов к выбору исходных данных при определении искомых величин: в первом подходе пользователь оперирует данными о плотности теплового потока q и массовой скорости хладагента w_p , а во втором – длиной труб $l_{\text{т}}$ и тепловой нагрузкой на змеевик Q_3 .

В **четвертой главе** рассмотрено влияние основных факторов на показатель внешней необратимости процесса, выполнен подбор оптимальных значений массовой скорости и длины испарительного участка для хладагентов R404A, R410A, R134a, R507A, R407C, R717 при разных сочетаниях исходных данных: $d_{\text{т}}$, t_0 , $x_{\text{н}}$, q или Q_3 приведены рекомендации по корректировке используемых при расчете исходных данных. В качестве критерия оптимальности автор принял минимум разности температур внутренней стенки трубы и кипящего хладагента на выходе из зоны кипения.

Пятая глава диссертации содержит информацию об экспериментальной установке с испарителем змеевикового типа, работающей на хладагенте R410A. Автор представил разработанную систему измерений с описанием измерительных преобразователей и приборов. При проведении испытаний одновременное измерение расхода F , плотности D и температуры T хладагента обеспечивалось массовым расходомером Optimass 6400C. Приводятся результаты характерных опытов, автор приводит таблицу с экспериментальными данными, полученными при двадцати установившихся режимах работы ХМ, куда входят расчетные значения коэффициента теплоотдачи и экспериментально полученные значения коэффициента теплопередачи и падения давления хладагента. Условия испытаний продолжительностью от 5 до 9 часов определялись диапазоном параметров: температура охлаждаемого воздуха на входе в воздухоохладитель $t_{\text{в}}=24.6...30.8^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха на входе воздуха в

воздухоохладитель $\varphi_1 = 18,5 \dots 49,6\%$, температура кипения хладагента $t_0 = 4,2 \dots 11,3^\circ\text{C}$, массовый расход хладагента $Ga = 140,2 \dots 221,3$ кг/ч. Рассмотрены методики и особенности определения КТО и градиента давления в трубах с внутренним микро-оребрением. В таблице автор приводит оценку эффективности микро-оребрённых труб по сравнению с гладкими, используя как расчетные, так и собственные экспериментальные данные.

Заключение содержит выводы по работе в целом и рекомендации для последующего исследования способов повышения точности определения локальных значений КТО и градиентов давления при кипении перспективных хладагентов в гладких трубах и трубах с внутренним микро-оребрением, совершенствования методик расчета КТО и падения давления хладагентов при низких температурах кипения и низких плотностях теплового потока, характерных для судовых ХМ.

Замечания по работе

Недостатков, носящих принципиальный характер, в работе не выявлено и имеются лишь некоторые замечания, которые не снижают научной и практической значимости работы и не ставят под сомнение ее основные положения. Среди таких замечаний выделим следующие:

1. Результаты экспериментальных исследований, изложенные в Главе 5 текста диссертации, в автореферате приводятся недостаточно подробно.
2. В Главе 4 диссертации на странице 106 приводится график сопоставления оптимальных длин зоны кипения $l_{\text{ко}}$ и $l_{\text{кост}}$, полученных двумя способами, но такой график сопоставления не приводится для демонстрации зависимости оптимальных массовых скоростей w_{p_0} и $w_{p_{\text{ост}}}$.
3. Как методики расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления хладагента, применяемые в работе, так и экспериментальные данные,

используемые в сопоставлении, являются зарубежными. Возникает вопрос: нет ли возможности применить отечественные наработки в этой сфере.

4. В автореферате не представлено приборное оформление стенда.
5. Холодильный цикл в в координатах $\lg P-i$ желательно убрать.
6. Из оглавления диссертации неясно чьи экспериментальные данные используются в Главе 3.
7. Желательно было бы получить аналитические данные по подбору хотя бы одного хладагента из группы ГФО.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Кошелева Сергея Валерьевича на тему «Повышение эффективности судовых холодильных машин путем выбора рациональных режимов кипения хладагента в испарителях» выполнена на должном научно-техническом уровне с подтверждением достоверности приведенных результатов. Работа актуальна, обладает научной новизной и практической значимостью.

Сделанные по работе замечания не отражаются на основных положениях, представленных автором к защите.

Результаты исследования достаточно полно освещены в публикациях, в том числе из перечня ВАК, и апробированы на конференциях, в том числе с международным участием.

Диссертационная работа представляет законченное самостоятельное научно-квалификационное исследование, в котором решена важная для морского, речного и рыбопромыслового флота задача по повышению эффективности испарителей, используемых в судовых холодильных машинах. Реализация предложенных автором рекомендаций позволит значительно повысить энергоэффективность и экологическую чистоту судовых и несудовых ХМ. Полученные автором научные и практические

результаты облегчат работу инженеров на этапе проектирования, подбора и оценки эффективности готовых судовых змеевиковых испарителей.

Диссертационная работа соответствует критериям 9-14 постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» и Высшей аттестационной комиссии, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Кошелев Сергей Валерьевич** заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные).

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры Инженерии процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств» 6 сентября 2019 г. протокол № 1, и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Заведующий кафедрой «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий»

доктор технических наук, профессор

Стрелюхина Алла Николаевна

Руководитель сектора холодильных систем

доктор технических наук, профессор

Бабакин Борис Сергеевич