

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук

Малышева Александра Александровича на диссертационную работу

Кошелева Сергея Валерьевича «Повышение энергоэффективности судовых холодильных машин путем выбора рациональных режимов кипения хладагентов в испарителях»

Актуальность избранной темы

Актуальность диссертации вытекает из приоритетных направлений, предусмотренных «Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации на период 2018-2025 гг.», в части «Создания «эффективной энергетики и новой архитектуры энергосистем», а также из «Перечня критических технологий Российской Федерации» в части «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии» и «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения».

Развитие судовой холодильной техники, как составной части судовой энергосистемы, в полной мере соответствует приоритетам Государственной стратегии.

Судовая холодильная техника должна обеспечивать функционирование: холодильно-морозильных комплексов, установок охлаждения грузовых помещений и систем охлаждения рыбы, провизионных кладовых, системы комфортного и технологического кондиционирования воздуха, систем охлаждения на специальных судовых объектах.

Энергоэффективность, как всеобщий тренд научно-технологического развития, применительно к судовой холодильной технике имеет некоторую специфику. Во-первых, это связано с автономностью систем энергообеспечения, во-вторых, с повышенными требованиями к

массогабаритным характеристикам, в-третьих, с необходимостью обеспечения высокой надежности и безопасности.

В системах охлаждения помещений, и технологического оборудования, широко используются испарители с внутритрубным кипением хладагентов, работающие при разных температурах кипения (в основном воздухоохладители). Главными задачами в этих условиях является необходимость обеспечения высокой тепловой эффективности в сочетании с минимальными гидравлическими потерями. Учитывая, что повышение интенсивности теплоотдачи, как правило, сопряжено с повышением перепадов давления, проблема интенсификации представляет собой совокупность оптимизационных задач.

Процесс кипения жидкостей в стесненном пространстве чрезвычайно сложен и известные дифференциальные уравнения, описывающие двухфазное течение, как правило, не решаются строго аналитически. До сих пор эмпирические или полуэмпирические зависимости являются основными в расчетной практике. Накопленный опыт проектирования низкотемпературных систем с внутритрубным кипением не всегда правомерен в современной практике, поскольку используемые расчетные зависимости были получены на рабочих веществах, выходящих или вышедших из употребления в основном в связи с проблемами экологии.

Данная диссертационная работа направлена на решение оптимизационных задач с использованием современных подходов к комплексному решению тепло-гидродинамических задач при внутритрубном кипении хладагентов в судовых низкотемпературных судовых установках.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Исследования научной проблемы являются развитием и логическим продолжением классических научных школ, признанных мировым сообществом. Это школы С.С. Кутателадзе, Д.А. Лабунцова, А.А. Гоголина,

Г.Н. Даниловой, Ю.В. Захарова с использованием результатов работ: Shah M.M., Kandlikar S.G., Thome J.R., Domanski P.A., Wang C., Winterton.

Автор диссертации провел глубокий анализ современного состояния исследований по проблеме внутритрубного кипения и на его основе сформулировал цели и задачи собственной работы.

В обобщенном виде цели и задачи исследования представляются следующим образом:

- развитие методологии оптимизации тепло-гидродинамических характеристик змеевиковых испарителей на основе комплексного подхода к исследованию процессов;
- исследование влияния режимов течения двухфазных потоков на процессы внутритрубного кипения;
- разработка алгоритмов и программ расчета тепло-гидродинамических процессов при кипении хладагентов в трубах;
- проведение теплотехнических испытаний воздухоохладителя с внутритрубным кипением в схеме холодильной машины.

Вполне обоснованными представляются следующие выводы, полученные на основании исследований.

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

2. Предложена тепло-гидродинамическая расчетная схема змеевиков с учётом изменения структуры двухфазного потока в калачах.

3. Составлены компьютерные программы, обеспечивающие выполнение совместного расчета показателей интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении ряда экологически безопасных хладагентов:

- а) в горизонтальных трубах;
- б) в плоских змеевиках.

Программой предусмотрена возможность изменения перечня

рассматриваемых хладагентов.

4. 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 различных хладагентов в змеевиковых испарителях.

Достоверность и новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна диссертации определяется комплексным подходом к анализу процессов на основе анализа локальной теплоотдачи с учетом режимов кипящего потока и потерь давления.

При разработке комплексного метода автор предлагает единый подход к описанию течения двухфазного потока, включая, незаслуженно пренебрегаемый многими авторами, ламинарный режим течения. По мнению автора диссертации, ламинарный режим наиболее характерен для судовых холодильных систем. С учетом этого вводится условное число критерия Рейнольдса, независимое от массового расходного паросодержания. Значения условного критерия Рейнольдса автор использует при модификации известных методик расчета локальной теплоотдачи. В дальнейшем при найденном критерии Рейнольдса вводится величина массового расходного паросодержания, с помощью которого вычисляются локальные тепло-гидродинамические параметры.

Автор создает собственный подход к комплексному методу оптимизации тепло-гидродинамических параметров на основе нахождения оптимального значения массовой скорости. При этом задача оптимизации разделена на две части: оптимизация массовой скорости и оптимизация длины трубы с учетом общей внешней нагрузки.

Проведен подробный анализ влияния основных внешних факторов: общей тепловой нагрузки, длины змеевика, температуры кипения на теплоотдачу и гидравлические потери.

Достоверность научных результатов и выводов основывается на фундаментальных работах теплообмена и гидродинамики и результатах предыдущих исследователей.

Полученные автором результаты достаточно апробированы на международных и российских конференциях.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Полученные в диссертации научные результаты являются определенным этапом развития комплексного подхода к анализу теплогидродинамических процессов при кипении жидкостей в стесненном пространстве. Математическая модель, связывающая локальную теплоотдачу, режимы течения и перепады давления, с помощью компьютерной программы, разработанной автором, позволяет обобщить значительный массив результатов экспериментов многих авторов в широком диапазоне свойств, режимных и геометрических параметров.

Предлагаемый диссертантом метод^f оптимизации теплогидродинамических характеристик и разработанный на его основе программный продукт, может быть использован при проектировании судовых низкотемпературных систем, а также при выборе режимов их эксплуатации.

Общая оценка содержания диссертационной работы

В диссертации проведен подробный анализ работ, посвященных исследованию процессов кипения жидкостей в трубах.

Достаточно обстоятельно проанализированы методы прогнозирования режимов течения кипящих жидкостей и основные типы диаграмм режимов. Обращено внимание на связь теплообмена и режимов двухфазных потоков.

При анализе методик расчета теплообмена в качестве наиболее перспективного направления была выделена методология расчета локальных коэффициентов теплоотдачи. В дальнейшем метод локального теплообмена был выбран в качестве основополагающего при разработке комплексного

подхода к анализу тепло-гидродинамических характеристик в змеевиковых испарителях.

Современные методики расчета локальных коэффициентов теплоотдачи автором были разделены на четыре группы:

1. Чисто эмпирические методики основаны на использовании теплообмена однофазной жидкости и поправочных множителей, зависящих от ряда безразмерных величин, учитывающих изменение массового паросодержания, в потоке плотность теплового потока, силы инерции и гравитации.

2. Методики, основанные на суперпозиции отдельных составляющих: пузырькового кипения и конвективного кипения.

3. Асимптотические методики, учитывает составляющие по степенной зависимости.

4. Феноменологические методы, основанные на учете режимов течения кипящей жидкости, с выраженной границей раздела фаз.

На основе анализа и сопоставления различных методов, автор формулирует собственную модель процесса внутритрубного кипения.

В отличие от часто используемого феноменологического подхода, автор принимает по аналогии с однофазным течением ламинарный режим, как наиболее характерный для малых массовых скоростей. По сути дела, автор использует гомогенную модель двухфазного течения наиболее характерного для пузырькового режима. Подтверждением принятия гомогенной модели является выбор условного числа Рейнольдса жидкости в качестве определяющего. С помощью условного критерия Рейнольдса и массового расходного паросодержания диссертант рассчитывает локальные коэффициенты теплоотдачи.

Представляется, что принятая модель достаточно обоснована для условий змеевиковых теплообменников, для которых характерны малые тепловые потоки и небольшие массовые скорости.

Одной из основных особенностей змеевиковых испарителей является наличие значительного числа обогреваемых участков труб и необогреваемых калачей, как источников значительного местного сопротивления. При разработке модели процесса змеевик рассматривается, как прямая обогреваемая труба, разделенная на зоны кипения и адиабатные участки.

Параллельно с расчетом локальных коэффициентов теплоотдачи вычисляются локальные и общие потери давления с учетом свойств новых экологически безопасных хладагентов. Совместное исследование теплоотдачи и потерь давления и явилось основой комплексного подхода, принятого автором.

Автором диссертации была разработана достаточно интересная методика оптимизации, основанная на минимизации разницы температур стенки трубы и температуры насыщения на выходе. Оптимизация проводится по значению вычисляемой массовой скорости. После определения оптимальной скорости может находиться оптимальная длина обогреваемого участка или величина общей тепловой нагрузки. В решении задачи оптимизации одновременно учитывалась динамика локальной теплоотдачи и локальных потерь давления. При этом принималась во внимание изменение температуры кипения по длине трубы.

Совместный учет локальной теплоотдачи и потерь давления при решении задачи оптимизации явился основой комплексного метода, который был применен автором при оценке внешней необратимости.

На основе разработанных автором моделей тепло-гидродинамических процессов были разработаны программы расчета, с использованием которых проводился численный эксперимент с привлечением значительной базы экспериментальных исследований российских и зарубежных источников. Сопоставление результатов численных экспериментов и данных авторов показало удовлетворительную сходимость, что свидетельствует об адекватности разработанных моделей.

Оценивая результаты анализа тепло-гидродинамических процессов, необходимо отметить высокий уровень компьютеризации диссертации, что делает ее современной, важной, весьма полезной и удобной для проектировщиков.

Интерес представляют испытания воздухоохладителя с микроорезбрением внутренней поверхности труб в схеме холодильной машины. Обращает внимание продуманность схемы экспериментального стенда, хороший уровень исполнения и приборного оснащения. Вне всякого сомнения, экспериментальная установка сможет играть и дальше важную роль в развитии данного направления.

В заключении дана общая объективная оценка выполненной диссертантом работы. В приложениях представлены все материалы, подтверждающие позиции, высказанные в тексте.

Диссертация написана технически грамотным языком и внутренним единством, что свидетельствует о личном вкладе автора в проведенные исследования.

Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. В нем отражены все основные блоки исследования - актуальность, цели и задачи, новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, степень достоверности, апробация результатов и их реализация, выводы. Структурно автореферат диссертационного исследования выполнен обоснованно.

Полнота публикации основных результатов диссертации

Основные результаты исследований по теме диссертации в достаточном объеме отражены в 20 печатных работах, в том числе в 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Замечания по диссертации

1. Как известно, значение коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата определяется величиной наименьшего коэффициента теплоотдачи, в данном случае внешнего теплообмена со стороны воздуха и мало зависит от внутреннего теплообмена. В какой степени является актуальной интенсификация теплообмена при кипении внутри трубы?

2. В работе указано, что наиболее высокие коэффициенты теплоотдачи имеют место при расслоено-волновом и кольцевом режимах потока. Что касается кольцевого режима то сомнения не возникают. Не совсем понятно это утверждение применительно к расслоенному режиму, поскольку при этой форме течения верхняя образующая трубы омывается потоком пара, что снижает средний по сечению коэффициент теплоотдачи.

3. Требуется разъяснения график 2.4. В частности, не понятен экстремум функции 5, а также комментарии к графику.

4. Требуется дополнительные комментарии к рис.4.2.а, 4.2.б. Чем объясняется экстремум функций при тепловом потоке $1500 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$?

Почему зависимости для аммиака качественно и количественно отличаются от зависимостей для других веществ?

5. В ряде случаев в текстовой части диссертации нарушена четкость изложения. В частности не понятно, что относится к анализу сторонних работ, а что сделано самим автором.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки представленной диссертации, теоретической и практической значимости выполненных исследований. Диссертационная работа Кошелева С.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения задачи повышения эффективности, надежности, и экологической безопасности судовых холодильных установок, имеющей

