УДК 621.56

Перспективные типы испарителей холодильных машин

Канд. техн. наук **А. А. МАЛЫШЕВ,** *канд. техн. наук* **В. О. МАМЧЕНКО,**
канд. техн. наук **В. М. МИЗИН, А. В. ПОТАНИНА,**
С. И. ПРОШИН, Т. И. ДЕВЯТОВ
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Посвящается 20-летию Международной академии холода

In the article the main perspective types of refrigeration evaporators are presented and the ways of their intensification are shown.

Keywords: tube-in-shell evaporator, intra pipe boiling, thermolysis coefficient, plate type evaporator, boiling in small channels, boiling in mini- and microchannels.

Ключевые слова: кожухотрубный испаритель, внутритрубное кипение, коэффициент теплоотдачи, пластинчатый испаритель, кипение в щелевых мини и микроканалах.

Международная академия холода — организация, объединяющая ведущих ученых и специалистов всего мира, связанных с развитием приоритетных направлений науки и техники низких температур, низкопотенциальной энергетики, а также биотехнологии и других важнейших областей человеческой деятельности.

Определение и анализ направлений научно технического прогресса в этих областях является главной задачей академии. Одному из таких направлений, а именно теплообменным аппаратам, играющим важнейшую роль в вопросах энерго- и ресурсосбережения техники низких температур, посвящена данная работа.

Теплообменные аппараты в значительной степени определяют массогабаритные и энергетические показатели холодильных машин. Так, доля испарительно-конденсаторных агрегатов в общей массе парокомпрессорных холодильных машин составляет 50÷70%, в теплоиспользующих — до 90%. Необратимые потери в аппаратах обуславливают до 30÷50% от общих энергетических затрат холодильных машин. Кроме потерь, связанных с передачей теплоты при конечных разностях температур в аппаратах, значительные энергетические затраты вызваны преодолением гидравлических сопротивлений при перекачке жидких и газообразных сред.

Переход России к рыночной экономике и наличие кризисных явлений в последние годы в значительной степени усиливают значение экономических факторов и, соответственно, определяют необходимость выбора оптимальных конструкций теплообменников и режимов их эксплуатации. При этом необходимо учитывать следующие внешние обстоятельства: сокращение отечественных научных исследований, посвященных вопросам техники низких температур; практически полная зависимость рынка от зарубежных производителей; экологические проблемы, обуславливающие приоритет природных хладагентов; тенденции создания малоемких систем по хладагенту. Последнее обстоятельство особенно важно для аммиачных холодильных установок, область применения которых согласно мировой практике значительно расширена.

Ниже приведен краткий обзор основных современных конструкций испарителей, которые в ближайшей перспективе будут находить применение в мировой практике.

Кожухотрубные испарители

В современных условиях одним из основных направлений в аппаратостроении является усовершенствование традиционных типов аппаратов. Значительная доля в выпускаемом оборудовании приходится на кожухотрубные испарители затопленного типа. Эти аппараты обладают рядом преимуществ: относительно высокая теплопередающая эффективность, надежность, а также отработанная годами простота в технологии изготовления, что значительно снижает стоимость аппарата.

Интенсифицировать теплообмен в рассматриваемом типе аппаратов можно как со стороны теплоносителя, так и со стороны рабочего вещества.

Практический интерес представляет поиск возможных методов увеличения теплоотдачи со стороны кипящего хладагента (особенно аммиака) в межтрубном пространстве испарителя.

Процесс кипения в плотных пучках труб сопровождается подъемом парожидкостной смеси снизу вверх и сходен с механизмом кипения в вертикальном канале сложной формы. В данных условиях, приближенных к вынужденному, направленному движению, интенсивность теплоотдачи будет определяться самим процессом парообразования и конвективной составляющей:

$$q = q_{\text{кип}} + q_{\text{конв}} \qquad (1)$$

где: $q_{\text{кип}}$ — передача теплоты за счет пузырькового кипения на стенке трубы;

$q_{\text{конв}}$ — конвективная составляющая.

Общая картина процесса кипения имеет сложный характер и во многом определяется гидродинамическими характеристиками двухфазного потока.

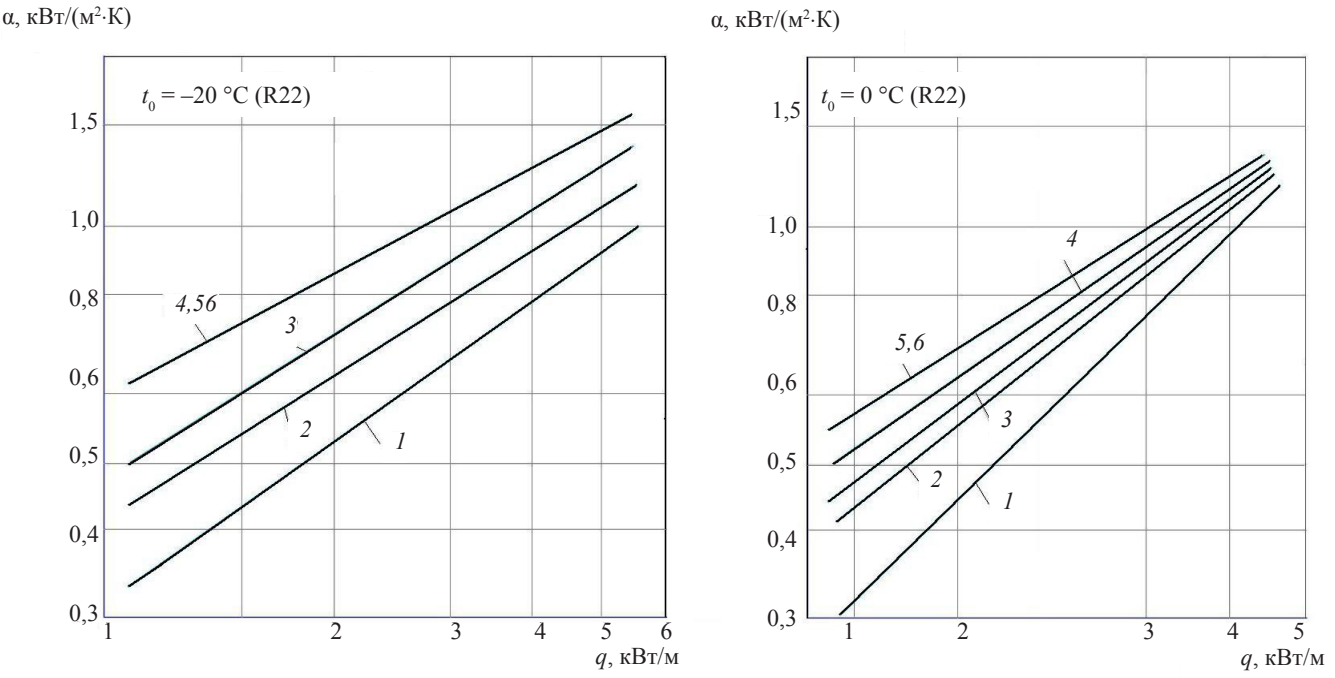

Рис. 1. Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока q для различных рядов труб пучка при кипении хладагента

На рис. 1 видно, что рост теплоотдачи и, следовательно, увеличение влияния q по высоте пучка связано с увеличением массовой скорости парожидкостной смеси по мере подъема пара и жидкости в затопленной части аппарата [1].

Таким образом, интенсификация конвективного теплообмена и самого процесса кипения может быть достигнута увеличением массовой скорости двухфазного потока хладагента. Для этого необходимо рациональное распределение потоков парожидкостной смеси и жидкости в аппарате, а также создание оптимальных гидродинамических условий в зоне циркуляции этих потоков [2, 3].

Ленинградским институтом холодильной промышленности, совместно с Черкесским заводом холодильного машиностроения (ЧЗХМ), были проведены испытания в составе холодильных машин опытных и промышленных образцов испарителей со специальным устройством. Данное устройство, называемое экраном [4], помещается между корпусом аппарата и пучком труб. Экран разделяет двухфазный поток с помощью гравитационных сил на две части: восходящий (пар и жидкость в пучке) и опускной (жидкость) потоки. Благодаря этому происходит снижение гидравлического сопротивления в опускном канале для жидкости, что приводит к увеличению скорости поднимающегося потока и, следовательно, теплоотдачи.

Эксперимент показал, что в диапазоне t_0 = –20÷0 ºС и q = 1500÷6500 Вт/м² установка экрана приводит к повышению коэффициента теплопередачи в хладоновом испарителе (фреон R22) с гладкими трубами (диаметр 25×3 мм) на 20÷30%, а в аммиачных — в 1,4÷1,6 раза при среднелогарифмической разности температур 5÷8 ºС и скорости теплоносителя w = 0,9÷1,18 м/с. На основании, полученных в 1986 г. данных, ЧЗХМ приступил к серийному выпуску испарителей с экраном для холодильных машин типа МКТ.

Другим направлением повышения эффективности аммиачных испарителей является уменьшение диаметра (d) теплообменных труб. В отечественных аппаратах средней производительности применяется гладкая стальная труба d = 25×2 мм. За рубежом используются трубы еще меньших размеров (до 12 мм), что позволяет значительно улучшить массогабаритные показатели аппаратов.

Перспективность предложенных технических решений подтверждается сравнительным анализом, приведенным ниже. За базовый вариант выбран аммиачный испаритель, выпускаемый немецкой фирмой ГЮНТЕР-ИЖ (г. Ижевск). Рассмотрены три варианта: применение труб d = 16×1,5 мм (без экрана); использование экрана в аппаратах с трубами d = 25×2 мм и d = 16×1,5 мм.

Из рис. 2 видно, что металлоемкость испарителей с трубами d = 16×1,5 мм (без экрана) и d = 25×2 мм (с экраном) может быть снижена в среднем до 38%, а в варианте d = 16×1,5 мм (с экраном) — в 1,8 раза.

Следует отметить, что предложенные практические решения позволяют унифицировать аммиачные испарители (с экраном) и конденсаторы, при этом установка экрана практически не усложняет технологию сборки испарителей.

Перспективным направлением является интенсификация теплообмена (внутри трубы и снаружи) за счет увеличения шероховатости поверхности. В работах [5–7] авторы предлагают для интенсификации теплообмена со стороны рабочих веществ использовать разработанный метод создания на поверхности труб микрорельефа в виде ребер различной формы [5, 6] и применение труб со специальным профилем [7]. Для получения достоверных данных по применению предлагаемых в этих работах решений к аммиачным испарителям необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований и испытаний аппаратов в схеме холодильной машины.

Испарители с кипением хладагентов внутри труб и каналов (далее внутриканальное кипение)

Испарители с внутриканальным кипением обеспечивают выполнение двух основных требований, предъявляемых к современным теплообменным аппаратам: минимизация емкости хладагента, относительно высокая энергетическая эффективность.

Выполнение этих требований может быть обеспечено только повышенной точностью расчетов теплогидродинамических характеристик и высоким уровнем автоматизированного регулирования режимов работы холодильной машины.

Внутриканальное кипение имеет ряд особенностей, отличающих этот процесс от кипения в большом объеме. Во-первых, кипение внутри каналов происходит в стесненных условиях, что обуславливает разнообразие режимов течения. В общем случае это пузырьковый, снарядный, кольцевой и эмульсионный режимы. В горизонтальных трубах существуют также волновой и расслоенный.

В общем случае передача теплоты при кипении в трубах и каналах определяется тремя составляющими [1]. В отличие от уравнения (1), здесь учитывается передача теплоты за счет испарения с поверхности пленки жидкости

$$q = q_{кип} + q_{конв} + q_{исп} \qquad (2)$$

Вклад каждой составляющей различен в зависимости от геометрических параметров, свойств хладагента, скоростей и режимов течения.

Испаритель с кипением хладагента внутри горизонтальных труб является одним из примеров теплообменников с внутриканальным кипением.

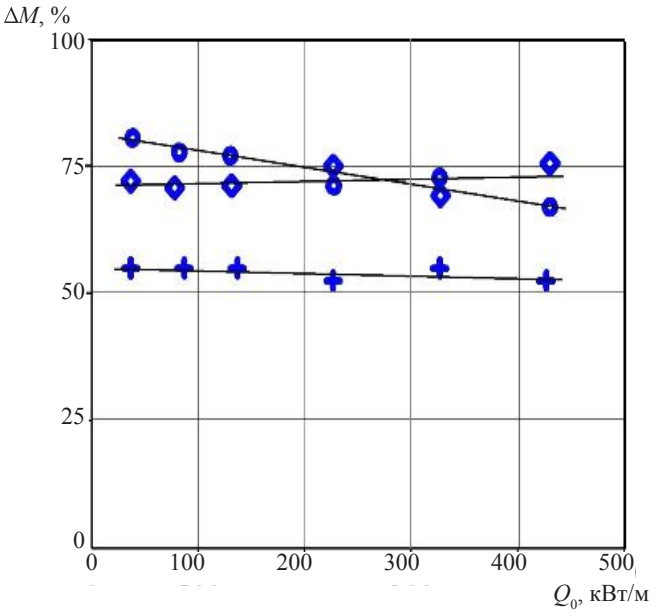

Рис. 2. Влияние размеров труб и экранов на металлоемкость испарителей:
◊ — d = 16×1,5 мм (без экрана);
○ — d = 25×2 мм (с экраном);
+ — d = 16×1,5 мм (с экраном)

Интерес к испарителям с внутритрубным кипением в последние годы возрастает. Пониженная емкость по хладагенту в сочетании с достаточно высокой тепловой эффективностью создают привлекательность для многих потребителей искусственного холода, в том числе использующих низкие температуры. В последние годы изменилась геометрия внутритрубного оребрения. Помимо труб с известными ребрами «звездочкой», образующими десять либо восемь каналов, стали использоваться трубы с микрооребрением. С этой позиции интересна работа [10], посвященная теплопередаче при кипении хладагента R134 и R404 в трубе с наружным диаметром 13,57 мм и высотой ребер на внутренней поверхности трубы 0,24 мм.

Опыты проводились при температурах кипения от 10 до –20 ºС. При массовой скорости 150 кг/(м^2 · с) не было обнаружено существенного воздействия плотности теплового потока, а основное влияние на локальную теплоотдачу оказывает массовое расходное паросодержание x. При этом в диапазоне $x = 0{,}3 \div 0{,}8$ коэффициент теплоотдачи изменяется от 8000 Вт/(м^2 · К) до 14000 Вт/(м^2 · К).

Что касается расчета теплообмена в испарителях с кипением внутри труб, то при отсутствии практически пригодных аналитических решений, эмпирические соотношения пока являются единственными принятыми в расчетной практике. Наиболее перспективным направлением представляется методика, основанная на интегрировании локальных значений теплоотдачи при использовании истинных скоростей фаз с учетом режимов течения. Такой подход был разработан и апробирован для хладагентов R12 и R22 [8] и использован В. Ф. Шуршевым [9] при внутритрубном кипении смесей R22 и R142b.

Общий вид зависимости локальных коэффициентов теплопередачи от массового расходного паросодержания показан на рис. 3 [8].

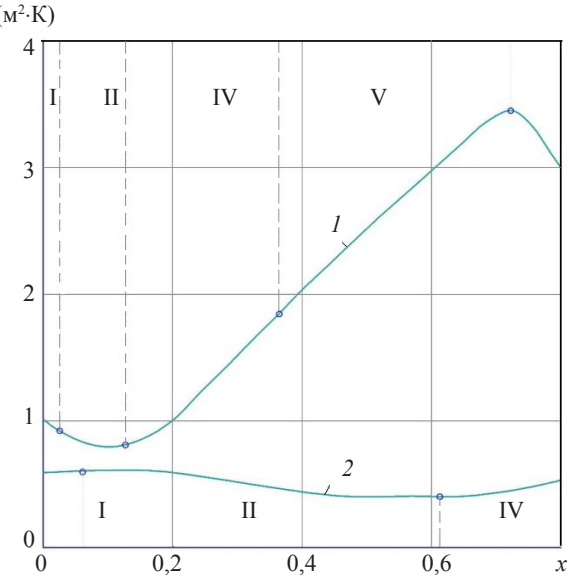

Рис. 3. Зависимость локального коэффициента теплоотдачи R12 от массового паросодержания при t_0 = –18 °С, $d_{вн}$ = 10 мм, q = 5 кВт/м^2:
1 — wρ = 244 кг/(м^2·с); 2 — wρ = 50 кг/(м^2·с);
I — снарядный режим; II — волновой;
IV — волновой кольцевой; V — кольцевой

Видно, что теплоотдача резко возрастает с переходом к кольцевому режиму, что объясняется увеличением вклада испарения $q_{кип}$ и снижением термического сопротивления пристенной пленки жидкости за счет ее турбулизации паровым ядром. При этом, как следует из рисунка, кольцевой режим наступает лишь при значительных скоростях на входе (линии *1* и *2*)

Следовательно, одной из задач, интенсификации испарителей с внутриканальным кипением является обеспечение условий перехода к кольцевому (стержневому) режиму течения. По мнению авторов, для горизонтальных труб наиболее физически обоснованной является методика предсказания режимов, основанная на истинном объемном паросодержании φ. В частности при кипении в горизонтальных трубах может быть рекомендована карта режимов φ — Fr_0 (рис. 4) [8].

Пластинчатые испарители

Теплопередача в пластинчатых испарителях осуществляется между потоком однофазного хладоносителя и кипящим хладагентом. Потоки движутся в смежных щелевых каналах сложной формы. Теплоотдача со стороны хладоносителя в канале с малым эквивалентным диаметром достаточно хорошо изучена и имеются надежные расчетные методики для теплообмена и потерь давления [1], [12]. Специфика однофазного течения заключается в том, что гофрированные пластины, развернутые друг относительно друга на 180º образуют каналы сложной сетчато-поточной формы. Формируется сеть расширяющихся и сужающихся каналов, что вызывает интенсивную турбулизацию. В результате турбулентный режим наступает при малых числах Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_0 \cdot D_0}{\nu} \geq 50,$$

здесь w_0 — скорость циркуляции (м/с).

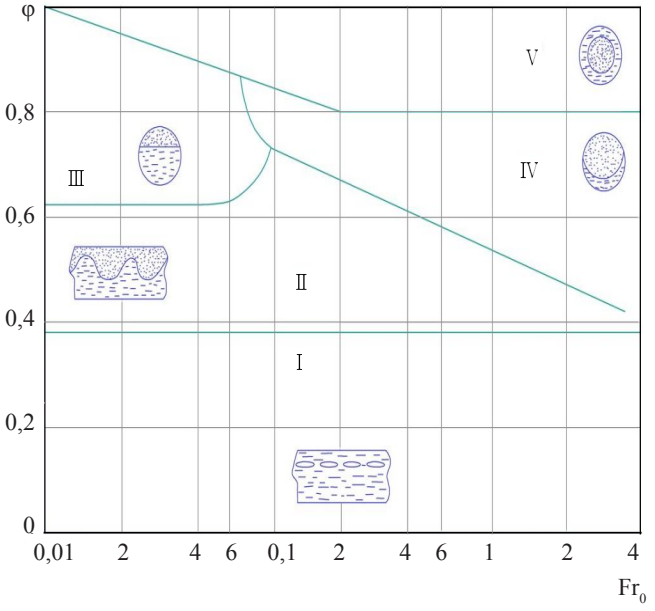

Рис. 4. Карта режимов течения двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах:
I — снарядный режим; II — волновой; III — расслоенный; IV — волновой кольцевой; V — кольцевой

Теплообмен при кипении в щелевом канале, осложненный наличием гофр, до настоящего времени представляет серьезную задачу не только для инженеров, но и для исследователей, хотя режимы течения в щелевых каналах не имеют принципиальных отличий от двухфазных потоков в вертикальных трубах [1].

Уравнение (2), включающее три составляющие, отводимой теплоты, вполне соответствует механизму кипения в щелевых каналах. Но при кипении в большом объеме основная часть теплоты отводится за счет $q_{кип}$ и в некоторой степени за счет конвективной составляющей $q_{конв}$. В трубах увеличивается вклады $q_{конв}$, а при кипении в стесненном пространстве при условии примерного равенства эквивалентного диаметра отрывному диаметру пузыря ($\delta \approx D_0$) $q_{исп}$ играет решающую роль. Пузырьки пара, зародившиеся на входном участке в канале, быстро вырастают до размера щелевого зазора, образуя режим «слитных пузырей». Резкий рост пузырей объясняется именно механизмом испарения. Далее наступает стержневой режим, для которого характерен интенсивный рост теплоотдачи рис. 5.

В результате в щелевых каналах стержневой режим существует на большей протяженности, чем в обычных круглых трубах, чем и обусловлена высокая эффективность пластинчатых испарителей.

В последние десятилетия пластинчатые аппараты все шире внедряются в холодильную и криогенную технику, системы кондиционирования воздуха в качестве высокоэффективных испарителей, конденсаторов, охладителей масла для винтовых компрессоров, утилизаторов теплоты конденсации, переохладителей жидкого аммиака, в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах и для других целей.

Промышленностью выпускаются разборные, полуразборные, сварные или паяные теплообменники. Учитывая условия работы теплообменников холодильных установок

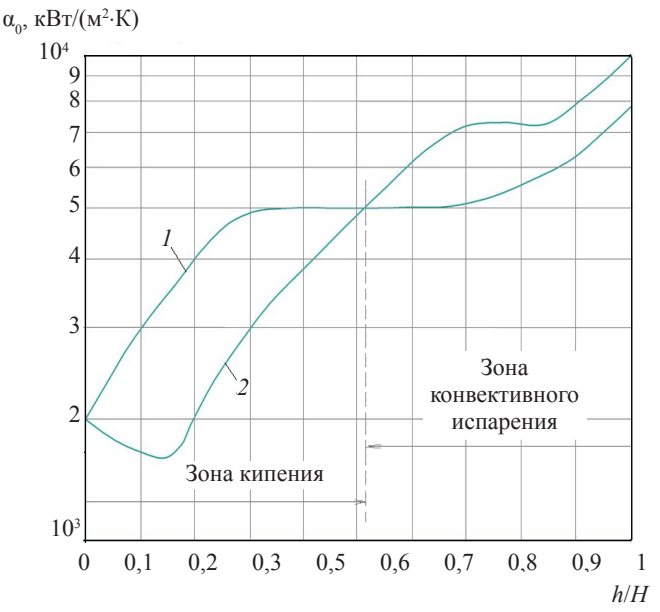

Рис. 5. Характер локальной теплоотдачи по высоте канала при кипении NH_3 для различных температур кипения (δ = 1,5 мм, H = 1,5 м, q = 5·10³ Вт/м²):
1 — t_0 = –10 ºС; 2 — t_0 = –30 ºС

(низкие температуры, высокие давления, специфические свойства рабочих веществ) предпочтительными для холодильной техники являются паяные и сварные аппараты.

Сравнение характеристик пластинчатой теплообменной аппаратуры с традиционной кожухотрубной свидетельствует о существенных преимуществах пластинчатых теплообменников, таких как:

— высокие коэффициенты теплопередачи при сравнительно небольших гидравлических сопротивлениях;

— компактность, меньшие массы пластинчатых аппаратов, а также существенное сокращение внутреннего объема по рабочим средам, что имеет особое значение при использовании дорогостоящих фреонов либо опасного аммиака. По данным ОАО «Орелхолодмаш», альтернативная замена панельного испарителя ИП–320 на пластинчатый аппарат ТПА–59–180–1–3–1,6, выпускаемый ОАО, при одинаковых производительностях позволяет снизить аммиакоемкость в 9 раз, а производственную площадь в 16 раз;

— высокая степень турбулентности потоков способствует некоторому самоочищению теплообменной поверхности и, следовательно, снижению продолжительности и стоимости ее очистки;

— наличие многочисленных точек контакта гофров пластин практически сводит на нет вибрацию аппарата;

— простота очистки теплообменной поверхности: химический способ — промывка с применением специальных составов, не разрушающих материал пластин и припоя для паяных или сварных теплообменников. По данным фирмы ЗАО «Промарматура XXI», длительность промывки не превышает трех часов. Открытый способ очистки — для разборных или полуразборных аппаратов;

— свободный доступ к теплообменной поверхности разборных аппаратов, ремонтопригодность, возможность легкой замены пластин или изменения требуемой площади теплообменной поверхности аппарата;

— расположение патрубков для входа и выхода рабочих сред на одной плите, отсутствие фундамента существенно упрощает монтаж аппаратов; компонуя определенным образом каналы выхода пара из испарителя и входа отепленного теплоносителя, можно получить на выходе из испарителя перегретый на несколько градусов пар, что обеспечивает сухой ход компрессора;

— как показывает практика, замерзание одной из сред в каналах пластинчатого аппарата не приводит к его разрушению (как в кожухотрубных теплообменниках), после размораживания его функции восстанавливаются. Последнее обстоятельство особенно важно при эксплуатации испарителей холодильных машин, когда возможна эксплуатация их при пониженных температурах кипения, выход из строя насоса хладоносителя или снижение концентрации хладоносителей;

— современные технологии при изготовлении пластин и аппаратов в целом;

— преимущества паяной или сварной пластинчатой аппаратуры перед кожухотрубной по массе и габаритам более очевидны с увеличением поверхности теплообмена, так как при этом растет только масса пластин (в кожухотрубных аппаратах увеличивается масса труб, обечайки, трубных решеток и крышек).

Современные паяные теплообменники, по данным фирмы Danfoss, способны успешно эксплуатироваться при температурах рабочих сред от минус 196 ºС до 200 ºС, рабочих давлениях — до 45 бар (усиленный вариант — до 67,5 бар). Диапазон производительностей составляет 0,5÷500 кВт. Цельносварной пластинчатый теплообменник фирмы АНВИТЕК, изготавливаемый по японским инновационным технологиям и помещенный в кожух рассчитан на работу в широчайшем диапазоне давлений и температур: p до 100 бар, температуры — от минус 250 до 950 ºС.

Известная фирма Alfa Laval — производитель пластинчатой теплообменной аппаратуры выпускает сварные и полуразборные испарители, хладагентами в которых являются аммиак, карбон диоксид, новые типы хладонов, хладоносителем — этиленгликоль. Фирма гарантирует эксплуатацию аппаратов до 20000 циклов с амплитудой 90 ºС и температурным градиентом 50 ºС в секунду. Материал пластин — нержавеющая сталь или титан, пайка осуществляется по вакуумной технологии, припоями служат медь или сплавы никеля (для аммиачной аппаратуры или конденсаторов, работающих на морской воде). При изготовлении сварных аппаратов используется лазерная сварка.

Широкий диапазон конструктивных особенностей пластин и аппаратов, выпускаемых промышленностью, позволяет в каждом конкретном случае подобрать теплообменник с наибольшей эффективностью.

Важнейшей проблемой, сдерживающей развитие производства отечественных пластинчатых испарителей, является отсутствие надежных экспериментальных данных и аналитических решений теплогидродинамических характеристик в щелевых каналах сложной формы.

Испарители с кипением хладагентов в малых каналах (компактные теплообменники)

Одним из новейших направлений развития науки в области внутриканального кипения являются изучение кипения в малых каналах.

Пока это направление является в целом поисковым и результаты исследований вида не нашли широкого практического применения.

Известен зарубежный опыт исследования компактных теплообменников в системах охлаждения топливных элементов ядерных и химических реакторов, в тепловых насосах, системах автомобильного кондиционирования и в холодильной технике.

Проблемам компактных теплообменников посвящена работа Д. Ховалыг и А. В. Бараненко [11].

Работа носит обзорный характер. Ссылаясь на работы американских коллег, авторы [11] приводят современную классификацию щелевых каналов в зависимости от гидравлического диаметра D_h:

— традиционные каналы, $D_h > 3$ мм;

— миниканалы, 200 мк $< D_h < 3$ мм;

— микроканалы, 10 мк $< D_h <$ 200 мк.

Также приводятся карты режимов в малых каналах и различные подходы к описанию гидродинамических процессов [11].

Отмечая безусловную перспективу этого типа теплообменников, авторы формулируют основные вопросы, стоящие перед исследователями, и на которые пока нет однозначного ответа:

1. Каким образом малый размер канала влияет на парообразование и на вынужденное течение двухфазного потока?

2. Каков характер изменения коэффициента теплоотдачи и градиент давления по длине канала?

3. Какие различия существуют в поведении потока при течении в одиночном канале и нескольких параллельных?

4. Каким образом обеспечивается равномерность распределения хладагента по параллельным каналам?

В данной работе рассмотрены некоторые типы испарителей холодильных машин и основные направления их интенсификации. Для дальнейшего развития холодильного аппаратостроения и оптимизации эксплуатационных характеристик низкотемпературных машин необходимы глубокие исследования на современном уровне с учетом требований времен.

Список литературы

1. *А. А. Гоголин, Г. Н. Данилова и др.* Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин — М: Легкая и пищевая промышленность, 1982.

2. *Мизин В. М., Сысоев В. Л. и др.* Интенсификация теплообменных аппаратов распределительных устройств. Тез. докл. ВНТК «Холод народному хозяйству». — Л.: ЛТИХП, 1991.

3. *Мизин В. М., Сысоев В. Л.* Модернизация существующих теплообменных аппаратов холодильных машин типа МКТ. Повышение эффективности холодильных машин и установок низкопотенциальной энергетики. Меж. вуз. сб. научных тр. — СПб.: СПбГАХПТ, 1995.

4. А. С. №1143945 Испаритель затопленного типа/Мизин В. М., Малявко Д. П., Сысоев В. Л. и др. — №3551155/23–06 Заявл. 09.02.83: Опубл. 07.03.85.

5. *Сухих А. А., Генералов К. С., Акимов И. А.* Испытания теплового насоса для теплоснабжения индивидуального дома //Т руды МГУИЭ. Техника низких температур на службе экологии. — М.: МГУИЭ, 2000.

6. *Сухих А. А., Шабанов А. А.* Экспериментальное исследование интегральных характеристик теплообмена в испарителе теплонасосной установки на R22./Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. –М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

7. Исследование холодильной установки с эффективным испарителем./Д. Х. Азизов, А. С. Карабаев и др./Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

8. *Малышев А. А., Данилова Г. Н. и др.* Влияние режимов течения двухфазного потока хладагента R12 на теплоотдачу при кипении в горизонтальных трубах. // Холодильная техника. 1982. №2.

9. *Шуршев В. Ф.* Моделирование процессов синтеза состава и теплоотдачи при кипении смеси холодильных агентов. Автореферат докторской диссертации. Астрахань, 2006.

10. *Klaws Spindler.* Yfns Műller — Steinhagen Flow boiling heat transfer of R134a and 414A in micofin tube at low mass fluxes and heat fluxes // Heat Mass Transfer. (2009) 45.

11. *Ховалыг Д., Бараненко А. В.* Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах. // Вестник Международной академии холода. 2012. №1.

12. *Данилова Г. Н. и др.* Теплообменные аппараты холодильных установок — Л.: Машиностроение. 1986.

Интернет-газета Холодильщик.RU www.holodilshchik.ru

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-20452 от 22 марта 2005 года

ПЕРВАЯ В РОССИИ ИНТЕРНЕТ-ГАЗЕТА ПО ХОЛОДИЛЬНОЙ И БЛИЗКОЙ ЕЙ ТЕМАТИКЕ

- холодильные новости;
- бытовое, торговое и промышленное холодильное оборудование;
- холодильники;
- охладители жидкости (чиллеры);
- оснащение и строительство супермаркетов;
- холодильный транспорт;
- кондиционирование и вентиляция;
- искусственные и природные хладагенты;
- холодильные масла;
- качество пищевых продуктов;
- сервис холодильных систем;
- литература по холодильной и близкой ей тематике;
- модульная, баннерная, видео- и аудиореклама;
- выставки, конференции, семинары;
- обучающие курсы для холодильщиков и многое другое…

http://www.holodilshchik.ru (http://холодильщик.рф)
e-mail: info@holodilshchik.ru