

М 87708

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ЛЫСЫЙ Олег Анатольевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ НА МАТРИЧНОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ИЗ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТИН

05.04.03 – Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем
кондиционирования

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Е.И.Микулин

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент Ю.А.Шевич

Официальные оппоненты :

доктор технических наук
О.К. Красникова

кандидат технических наук И.Д.Диев

Ведущая организация - НПО "Криогенмаш"

Защита состоится " " 1988
Специализированного
по адресу: 107005, "

С диссертацией
им. Н.Э.Баумана.

Автореферат р

Ученый с
Специализирован
кандидат техническ

M 8770 P

Актуальность темы. Развитие криогенной, холодильной и других отраслей техники и технологии характеризуется непрерывным увеличением энергонапряженности элементов энергетических установок. Тепло- и массообмен лежат в основе многих технологических процессов. Интенсификация теплообмена в аппаратах, реализующих кипение теплоносителя, является важной научно-технической задачей, так как до 20...30 % энергетических затрат в криогенных и холодильных установках и до 40% их массы приходится на испарители.

Одним из перспективных и эффективных способов интенсификации кипения является использование различных модификаций теплообменных поверхностей. Наряду с традиционно используемыми гладкотрубными аппаратами широкое распространение получили пластинчатые, пластинчато-ребристые, а также испарители с различными типами насадок, турбулизирующими вставками, пористыми заполнителями, позволяющими значительно интенсифицировать теплообмен при кипении. Использование таких аппаратов позволяет значительно интенсифицировать процессы парообразования, а следовательно, и уменьшать объем и массу как самого испарителя, так и всей установки в целом.

Аппараты матричного типа относятся к классу высокоэффективных теплообменников с развитой поверхностью и высокой компактностью. Аппараты с матричной поверхностью нашли широкое применение для конвективного теплообмена как газов, так и жидкостей. Однако отсутствует информация по теплообмену при кипении на матричной поверхности. Массо-габаритные показатели показывают значительное превосходство матричных аппаратов по сравнению с другими. Использование их в технологических установках позволяет снижать объем и массу как самого испарителя, или теплообменника, так и всей установки в целом.

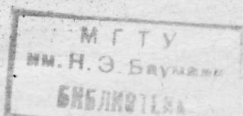
При проектировании различных установок необходимо производить тепловые и гидравлические расчеты входящих в них аппаратов и устройств. А для этого необходимо иметь информацию о

НПО МГТУ им. Н.Э. Баумана



1087708

Пысий О.А. Эксперименталь



механизме и интенсивности теплообмена при парообразовании на матричной поверхности, а также по гидросопротивлениям при течении одно- и двухфазного потоков. Отсутствие данной информации затрудняет использование матричных аппаратов в качестве испарителей. Все это определило цель и задачи настоящей работы.

Цель и задачи работы. В работе решаются следующие задачи:

- разработка методики экспериментального исследования процессов кипения на матричной теплообменной поверхности;
- установить влияние на интенсивность теплообмена при кипении следующих параметров: плотности теплового потока q , массовой скорости потока $\dot{m}$, паросодержания x , степени недогрева $\Delta T_{\text{нт}}$ до температуры насыщения T_s ;
- разработка расчетных соотношений для расчета интенсивности теплообмена в различных режимах кипения: частичного, поверхностного, пузырькового, конвективного;
- оценка значений плотности теплового потока, при которых на поверхности начинают проявляться кризисные явления;
- оценка гидродинамики двухфазного потока при течении в каналах матричного типа;
- анализ конструктивных, геометрических характеристик аппаратов матричного типа с целью выработки рекомендаций по организации поверхности (выбору геометрических параметров) для высокоэффективных испарителей;
- Цель работы - разработка инженерной методики расчета интенсивности теплообмена и выработка рекомендаций по конструированию испарительных элементов с матричной поверхностью теплообмена для энергетических установок.

Методы исследования. В процессе работы были разработаны оригинальная методика экспериментального исследования, изготовлены модели матричных аппаратов, а также стенд в лаборатории кафедры Э-4 "Криогенная техника и кондиционирование" МГТУ им. Н.Э.Баумана с использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры. Обработка результатов производилась с использованием методов математической статистики.

Достоверность полученных результатов в работе подтверждается использованием современных методов экспериментального исследования и средств измерения, применением методов математической статистики при обобщении результатов. Повторяемость результатов удовлетворительная. Величина погрешности измерения не превышает 33,0 %, что соответствует данным других авторов при исследовании нестационарных двухфазных потоков.

Научная новизна. В работе впервые получены экспериментальные данные по кипению на матричной теплообменной поверхности из перфорированных пластин в условиях большого объема и вынужденной конвекции. Для этого была разработана методика экспериментального исследования и обработки результатов эксперимента по кипению в каналах матричного типа.

В работе получены расчетные соотношения, позволяющие рассчитывать интенсивность теплообмена при кипении, а также влияние на нее следующих параметров: плотности теплового потока q , массовой скорости $\dot{m}$, степени недогрева $\Delta T_{нг}$, паросодержания X .

Получены расчетные соотношения для расчета интенсивности теплообмена при различных режимах кипения: частичного, поверхностного, пузырькового, конвективного кипения.

Получены расчетные соотношения, позволяющие рассчитать гидродинамику двухфазного потока в канале матричного типа.

Предлагаются рекомендации по конструированию матричных испарителей, выбору геометрических параметров. Предложена методика расчета матричного испарителя.

Практическая ценность. На основании результатов экспериментального исследования для практического использования предлагаются:

- соотношения, удобные для практического применения в расчетах интенсивности теплообмена при кипении на матричных поверхностях из перфорированных пластин в различных режимах;
- соотношения для учета влияния паросодержания, массовой скорости, величины недогрева на тепловые и гидравлические характеристики теплообмена двухфазного потока, кипящего на матричной поверхности;

- практические рекомендации для учета влияния геометрических параметров матрицы при конструировании аппаратов, обеспечивающих удовлетворительные теплогидравлические характеристики теплообмена.

Реализация результатов. Результаты исследований внедрены при проработке новых высокоэффективных типов испарителей, а также при эскизном проектировании технологических аппаратов, реализующих кипение теплоносителя.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Хриогенная техника и кондиционирование" Э-4 МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1991-1993 гг.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в печатных работах, список которых прилагается.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и содержит 141 страницу машинописного текста, 50 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 53 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность рассматриваемой проблемы и приведено краткое содержание работы.

В первой главе проведен анализ работ по теплообмену при кипении в условиях вынужденного течения в каналах различных типов. Представлена физическая модель парообразования в условиях вынужденной конвекции, а также механизм теплопередачи от поверхности теплообмена к испаряющемуся микрослою жидкости. Изложены основные методы расчета гидравлических параметров двухфазного потока в каналах различных типов.

Проведен анализ методов расчета интенсивности теплообмена при кипении в гладких каналах. Показано, что все известные методы можно сгруппировать следующим образом:

- методы, основанные на принципе суперпозиции независимых механизмов теплообмена;
- методы с использованием поправочных коэффициентов, учитывающих интенсификацию теплообмена, по сравнению с вынужденной конвекцией жидкости;
- методы, основанные на предположении однородной структу-

ры двухфазного потока.

Представлены основные соотношения для каждого из методов. Среди методов, входящих в первую группу, наиболее полно разработаны методы расчета, предложенные С.С.Кутателадзе, Ченом, Розеноу. В них вклад конвективной составляющей рассчитывается по известному соотношению Диттуса-Белтера, а вклад за счет кипения теплоносителя — по известным соотношениям Форстера-Зубера, Купера или Кутателадзе. Полученные составляющие затем суммируются определенным образом. Показано, что данные методы расчета наиболее эффективны в области перехода от однофазной конвекции к развитому пузырьковому кипению, т.е. в области, где вклад обоих независимых механизмов теплообмена соизмерим.

Среди методов второй группы представлены методы расчета, предложенные В.М.Боришанским, А.М.Кутеповым, Л.С.Стерманом, Н.Г. Стюшиным, а также Денглером-Аддамсом, Майнгером, Беннетом. Во всех представленных методах расчета соотношение интенсивности теплообмена при двухфазной и однофазной конвекции выражено с помощью комплексов, учитывающих изменение свойств потока, ускорение потока в результате испарения, а также повышение интенсивности теплообмена за счет изменения агрегатного состояния вещества. В эти комплексы входят известные параметры Локкарта-Мартинелли, Чизхолма, модифицированное число кипения, которые являются термодинамическими характеристиками двухфазного потока. Эти методы наиболее предпочтительны при конвективном кипении.

В основе методов третьей группы лежит предположение однородности потока парожидкостной смеси. Это достигается при высоких паросодержаниях, а также за счет применения различных турбулизирующих вставок, способствующих раздроблению крупных паровых образований и хорошему перемешиванию потока.

В следующем разделе первой главы проведен анализ факторов интенсификации теплообмена в каналах сложной формы, среди которых можно выделить следующие: увеличение числа активных центров парообразования, создание стесненных условий роста паровых пузырьков, что вызывает его сплющивание, утонение жидкостного микрослоя под ним, снижение его термического сопротивления и увеличение площади испаряющейся поверхности, турбулизация потока за счет специальных вставок, размещаемых в каналах, или применение

нение каналов со сложной, меняющейся формой сечения, повышение компактности теплообменной поверхности за счет оребрения. Здесь же проведен анализ работ, в которых исследовалось влияние стесненных условий на интенсивность парообразования. Интенсификация теплообмена, в этом случае, достигается путем затруднения эвакуации пузырька от теплообменной поверхности. При этом пузырек сплющивается, испаряющийся микрослой жидкости под ним утончается, снижается его термическое сопротивление, а следовательно, и возрастает количество теплоты, передаваемое через этот микрослой.

Среди работ по теплообмену в каналах сложной формы приведены данные по следующим видам поверхностей: пластинчатые (из пластин с гофрами), пластинчато-ребристые, поверхности с пористыми покрытиями, а также каналы с пористыми заполнителями и др.

Далее приведены данные по кризису теплообмена при кипении в каналах сложной формы.

В заключение первой главы представлены особенности матричной теплообменной поверхности из перфорированных пластин. Матричная теплообменная поверхность образуется при чередовании высокотеплопроводных элементов — перфорированных пластин и низкотеплопроводных дистанционных прокладок. Форма и размеры каналов, определяются окнами, выполненными в прокладках. Теплопередающие элементы и дистанционные прокладки, собранные в монолитный блок путем склеивания, сварки или пайки, образуют многоканальную структуру с развитой поверхностью теплообмена. Теплообменивающиеся потоки проходят по смежным герметичным между собой каналам. А тепловой поток между каналами передается за счет теплопроводности перфорированных пластин.

Основным преимуществом матричных аппаратов является высокая компактность поверхности, которая может достигать $6000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, что характерно кроме них только пластинчато-ребристым аппаратам.

По пористости матричная насадка близка к пористым заполнителям и каналам с пористыми высокотеплопроводными заполнителями.

Существенным достоинством матричных аппаратов является анизотропия поверхности, заключающаяся в низкой продольной (в направлении течения теплоносителя) и в высокой поперечной (в направле-

нии передачи теплоты) теплопроводности.

Еще одной особенностью матричных аппаратов является расположение поперек канала турбулизирующих элементов – перфорированных пластин.

Анализ особенностей высокоэффективных испарителей и сопоставление их с особенностями матричного теплообменного аппарата позволяет выделить следующие факторы, способствующие высокой интенсивности кипения в последних :

- при выборе оптимального расстояния между перфорированными пластинами реализуются стесненные условия паробразования;
- при натекании потока на перфорированную пластину под действием сил инерции происходит сепарация фаз и обеспечивается смачивание теплоотдающей поверхности жидкостью вплоть до самых высоких паросодержаний;
- возможность совместного сосуществования по длине ребра двух различных механизмов кипения – пленочного и пузырькового, причем благодаря теплопроводности перфорированных пластин, осуществляется переток тепла в зоны с более интенсивным – пузырьковым кипением;
- высокая степень ребрения теплопередающей поверхности позволяет передать через основание ребра тепловые потоки значительно превышающие критическое значение для гладкой поверхности.

Для реализации поставленных задач и цели исследования были разработаны и изготовлены два типа моделей матричных испарителей и экспериментальный стенд, подробное описание которых приведено во второй главе.

Модели первого типа МТ-I состояли из медных перфорированных пластин и паронитовых дистанционных прокладок. Модель выполнена одноканальной, а обогрев осуществляется от внешних источников инфракрасного излучения, нагревающих торцевые поверхности перфорированных пластин. Далее тепло передается внутрь канала за счет теплопроводности пластин. Предусмотрена возможность визуального наблюдения структуры потока.

В моделях второго типа матрица выполнена цельнометаллической из антикоррозионной стали путем изгиба перфорированной ленты. Матрица располагалась в разборном текстолитовом кожухе, а ее обогрев осуществлялся при непосредственном протекании по ней электрического тока.

готовленные модели позволяют исследовать кипение в каналах матричного типа в условиях вынужденного течения, а модели второго типа МТ-2 — еще и в условиях погружения в большой объем.

Геометрические параметры исследованных моделей лежат в следующих диапазонах: диаметр перфорации — 1,6...2,0 мм, шаг перфорации — 2,5 мм, толщина пластин — 0,2...1,0 мм, зазор между пластинами — 0,71...1,03 мм, компактность поверхности — 972,5...1512 м²/м³, пористость — 0,73...0,92, эквивалентный диаметр — 2,0...3,8 мм.

При кипении в большом объеме модель погружалась в термостат, постоянная температура в котором поддерживалась с помощью погружных нагревателей. При кипении в условиях вынужденного течения экспериментальный контур включал следующие аппараты: ротаме р, водоподогреватель, предварительный испаритель, исследуемая модель, сепаратор. Кипящая жидкость на входе в исследуемую модель может быть в состоянии насыщения или быть недогретой, а также иметь паросодержания 0...8 %. Были проведены тарировочные эксперименты по определению величины тепловых потерь в экспериментальном контуре. При температуре потока близкой к температуре насыщения величина потерь не превышает 5 %.

Далее во второй главе представлены методы измерения параметров потока: температуры, давления, массовой скорости, а также определения паросодержания. Для определения температур используются медь-константановые термопары, спаи которых располагались в узловых точках: на входе и выходе из предварительного испарителя, а также на входе и выходе их моделей матричного испарителя. Для измерения температуры поверхности также использовались медь-константановые термопары, спаи которых устанавливались на перфорированных пластинах. Причем таких пластин изготавливалось не менее трех и располагались они в различных сечениях матрицы по ходу потока.

Паросодержание на входе в модель определялось по тепловому балансу предварительного испарителя, а на выходе из модели — по тепловому балансу самой модели.

Величина подводимого теплового потока в моделях МТ-1 определялась по разности температур в стенке модели со стороны нагревателей и со стороны кипящего потока. В моделях МТ-2 — по мощности тепловыделения при непосредственном протекании электрического тока через цельнометаллическую матрицу.

В заключение второй главы приведены методики обработки результатов эксперимента, а также произведена оценка величины погрешностей измерения и расчета величин. Величина погрешности не превышает 33,0 %, что соответствует данным других авторов при исследовании нестационарных двухфазных потоков.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования кипения в канале матричного типа из перфорированных пластин как в условиях вынужденного течения, так и при погружении в большой объем. А также представлены обобщающие зависимости, позволяющие с достаточной точностью описать все полученные экспериментальные данные.

Экспериментальные точки по кипению в большом объеме на матричной поверхности ложатся на кривые со степенной зависимостью (рис. I)

$\alpha \sim q^{0,7}$, что характерно для развитого пузырькового кипения и на других типах поверхностей. Однако полученные кривые смещены в область меньших температурных напоров по сравнению с кривыми, описывающими кипение на гладких поверхностях, что свидетельствует о более высокой интенсивности теплообмена на матричных поверхностях. Для описания экспериментальных данных может быть использовано соотношение:

$$\alpha_{\text{кип}} = A^* \cdot q^{0,7} \quad (1)$$

Обобщение результатов эксперимента позволило получить значение коэффициента $A^* = 13,44$, которое одинаково для всех исследованных моделей и не зависит от геометрических параметров матрицы в исследованном диапазоне параметров.

При кипении в условиях вынужденного течения при значениях $q > 10 \text{ кВт/м}^2$ экспериментальные точки ложатся в ту же область, что и точки, полученные при кипении в большом объеме. При значениях $q < 2 \text{ кВт/м}^2$ экспериментальные точки ложатся на кривые, описывающие теплообмен при вынужденной конвекции жидкости в канале матричного типа:

$$\alpha_{\text{вк}} = 0,22 Re_{\text{ж}}^{0,69} Pr_{\text{ж}}^{0,33} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{ж}}} \quad (2)$$

Это подтверждает наличие двух независимых механизмов теплообмена

пузырькового кипения и вынужденной конвекции, вклад каждого из которых в интегральные характеристики процесса учитывается известным уравнением С.С.Кутателадзе, основанным на принципе суперпозиции (Рис. 1):

$$\alpha = \sqrt{\alpha_{\text{вк}}^2 + \alpha_{\text{кип}}^2} \quad (3)$$

В случае недогрева жидкости до температуры насыщения кривая кипения смещается в область больших температурных напоров (т.е. интенсивность теплообмена снижается). Полученные экспериментальные данные могут быть описаны с помощью соотношения (1), однако коэффициент A^* изменяется в зависимости от величины недогрева. Так как коэффициент A^* является функцией не только недогрева, но и давления он может быть представлен в виде:

$$A^* = A_{\text{нт}} \cdot F(p) \quad (4)$$

где параметр давления $F(p)$ принят равным 0,6 в диапазоне давления в модели $P = 0,1 \dots 0,5$ МПа.

Значения коэффициента $A_{\text{нт}}$ определялись экспериментальным путем и могут быть обобщены соотношением (рис. 2):

$$A_{\text{нт}} = M - a \cdot \Delta T_{\text{нт}} \quad (5)$$

В данном соотношении значения коэффициентов M , a зависят от режима теплообмена. Экспериментально были установлены следующие режимы теплообмена:

- частичное поверхностное кипение ($M = 7,57$, $a = 0,133$);
- развитое поверхностное кипение ($M = 22,4$, $a = 2,33$);
- развитое пузырьковое кипение ($M = 22,4$, $a = 0$).

Для каждого из режимов характерны определенные особенности парообразования, структуры двухфазного потока, распределения зоны активного парообразования по перфорированным пластинам. Они различаются по интенсивности теплообмена и величине недогрева жидкости. Так границей между режимами частичного и развитого поверхностного кипения является $\Delta T_{\text{нт}} = 6,8$ К. А развитое пузырьковое

кипение имеет место, когда весь поток прогрет до температуры насыщения.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило наличие особой зоны теплообмена - области конвективного кипения, которая сменяет область пузырькового кипения по мере роста паросодержания. Отличительной особенностью данной области является существенное влияние паросодержания потока на интенсивность теплообмена. Рост паросодержания приводит к увеличению скорости двухфазной среды, а следовательно и к повышению интенсивности конвективного переноса теплоты. Пузырьковый режим течения сменяется паровыми струями, крупными паровыми конгломератами, которые, проходя сквозь матричную структуру, дробятся, что приводит к формированию вспененного режима течения, способствующего лучшему смачиванию поверхности жидкостью.

Проведенное исследование позволило получить соотношение, в котором влияние паросодержания и свойств паровой и жидкой фаз на интенсивность теплообмена учитывается с помощью параметра Локкарта-Мартинелли (рис. 3):

$$\frac{\alpha}{\alpha_{жк}} = 7,25 \left(\frac{1}{\chi_{tt}} \right)^{0,5} \quad (6)$$

где параметр Мартинелли определяется как соотношение потерь давления жидкой и паровой фаз :

$$\chi_{tt} = \left(\frac{\Delta P_{ж}}{\Delta P_{п}} \right)^{0,5} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{п}} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Представленные выше соотношения (I)-(6) позволили обобщить практически все полученные экспериментальные данные, причем погрешность обобщения не превышает $\pm 25\%$, что лежит в пределах погрешности эксперимента.

Необходимо отметить, что с ростом паросодержания, увеличивается удельный объем потока и его линейная скорость. При этом возрастают гидравлические потери, затрудняется эвакуация пара через регулярную насадку канала и циркуляция жидкости в контуре. Это приводит к ухудшению смачивания поверхности, возникновению сухих пятен и снижению интенсивности теплообмена. Были экспери-

ментально определены величины плотности теплового потока, при которых на поверхности теплообмена начинают проявляться кризисные явления. Полученное значение $q_{кр} = 300 \text{ кВт/м}^2$, достаточно хорошо согласуется с величиной критической плотности теплового потока в щелевых каналах, если в качестве характерного линейного размера использован эквивалентный диаметр канала. Это позволяет рекомендовать соотношение:

$$q_{кр}^1 = 0,0013 r g^{0,7} \rho_{ж}^{1,43} d_3^{1,86} / \mu_{ж}^{0,43} H^{0,7} \quad (8)$$

описывающее кризис кипения в плоских щелевых вертикальных каналах для оценки области возникновения кризисных явлений на матричной теплообменной поверхности из перфорированных пластин.

В заключение третьей главы представлены данные по экспериментальному исследованию гидросопротивления каналов с матричной насадкой. Визуальные наблюдения структуры потока в моделях МТ показали, что в зависимости от режимных параметров последовательно сменяются различные режимы течения, при этом изменяется структура потока, размеры и форма паровых образований, доля сечения, занятая паром, жидкостью, двухфазным потоком.

Полученные значения потерь давления при течении парожидкостного кипящего потока были обобщены с помощью известного соотношения:

$$\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_{уск} + \Delta P_H \quad (9)$$

в котором полные гидропотери представлены в виде суммы гидропотерь за счет сил трения $\Delta P_{тр}$, за счет ускорения потока в результате испарения $\Delta P_{уск}$, составляющая на преодоление нивелирного напора ΔP_H . Для определения последних составляющих используются известные соотношения, а гидропотери на преодоление сил трения - по соотношению:

$$\Delta P_{тр} = \Delta P_{ж} \cdot \left(1 + \frac{C}{\chi_{tt}} + \frac{1}{(\chi_{tt})^2} \right) \quad (10)$$

где гидропотери при течении жидкости в аппарате матричного типа

$$\Delta P_{ж} = \frac{1}{2} \xi \cdot \frac{\dot{m}^2 \cdot H}{\rho_{ж} \cdot d_3} \quad (11)$$

коэффициент гидросопротивления матрицы:

$$\xi_0 = (0.707 \sqrt{1 - \rho'_{nn}} + 1 - \rho'_{nn})^2 \cdot [1 + 0.08 \left(\frac{\delta_n}{\alpha_0}\right)^{0.8}] \quad (12)$$

а значение коэффициента C для турбулентно-турбулентного режима течения парожидкостной смеси равно 20.

Как показало сопоставление величин трех составляющих гидropотерь, основной вклад вносят гидropотери за счет трения (до 95 %), а гидropотери на преодоление нивелирного напора не превышают 0,1 % (рис. 4).

Представленные выше соотношения позволяют с достаточной степенью точности рассчитать гидropотери при течении двухфазного потока в канале матричного типа.

В главе 4 проведен анализ влияния геометрических параметров матрицы на интенсивность кипения и гидравлическое сопротивление аппарата, а также проведен анализ влияния различных факторов на устойчивость процесса. Выработаны рекомендации по конструированию аппаратов матричного типа и методика расчета таких аппаратов.

В заключение проведено сопоставление конденсаторов-испарителей матричного типа с известными конструкциями: трубчатым с внутритрубным кипением и пластинчато-ребристым. Сопоставление проводилось по массо-габаритным показателям. В результате было установлено, что при одинаковых тепловых нагрузках и температурных условиях трубчатые аппараты в 10 раз (по объему), а пластинчато-ребристые в 1,4...1,8 раза (по объему) превышают матричные. В тоже время масса аппарата матричного типа в 3,5...4,0 раза меньше массы аналогичного аппарата трубчатого типа (рис. 5).

Замена традиционно используемых трубчатых аппаратов матричными позволяет существенно уменьшить массо-габаритные показатели всей установки в целом. А учитывая, что стоимость аппарата пропорциональна его массе и размерам, можно предположить значительное удешевление как самого аппарата, так и всей установки в целом.

1. В данной работе впервые получена количественная информация по интенсивности теплообмена при кипении на матричной теплообменной поверхности, состоящей из перфорированных пластин.

2. Разработана методика экспериментального исследования теплообмена при кипении в моделях матричных теплообменных аппаратов в условиях большого объема и при вынужденном течении жидкости.

3. Проведено экспериментальное исследование теплообмена в 6 моделях МТ с различными геометрическими параметрами перфорированных пластин и матриц ($d_o = 1,6 \dots 2,0$ мм, $t = 2,5$ мм, $\delta_{np} = 0,2 \dots 1,0$ мм, $\delta_n = 0,71 \dots 1,03$ мм) в широком диапазоне режимных параметров ($\dot{m} = 28,9 \dots 104,3$ кг/м²·с, $q \leq 300$ кВт/м², $\Delta T_{нт} = 0 \dots 34$ К, среднее значение паросодержания $\bar{X} = 0 \dots 8$ %, значение паросодержания на выходе из модели $x_{вых} \leq 13$ %).

4. Результаты экспериментального исследования теплообмена в аппарате матричного типа обобщены зависимостями, удобными для практического применения для расчета интенсивности теплообмена.

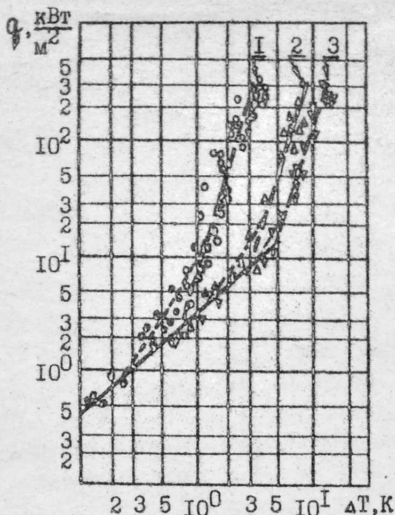
5. Исследована качественная структура потока кипящей жидкости в канале матричного типа, предложена физическая модель парообразования, проведен анализ факторов, интенсифицирующих теплообмен (реализация стесненных условий парообразования, турбулизация потока и т.д.).

6. Исследованы гидравлические потери при течении парожидкостного потока в канале матричного типа, предложен метод расчета гидросопротивления аппаратов матричного типа.

7. Получены данные по области ухудшения теплообмена. Произведена оценка критической плотности теплового потока в аппаратах матричного типа, которая составила величину ~ 300 кВт/м².

8. Проведено расчетное сравнение интенсивности теплообмена при кипении жидкостей в аппаратах с матричной и другими эффективными поверхностями теплообмена. Показаны массо-габаритные преимущества аппаратов матричного типа.

9. Предложены практические рекомендации для учета влияния геометрических параметров перфорированных пластин и матриц при



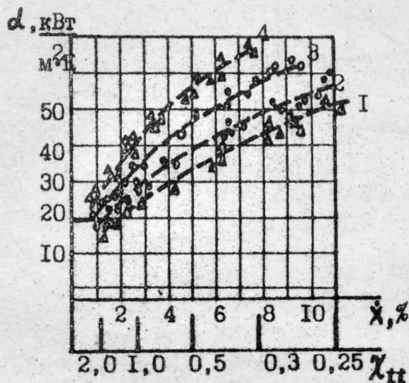
Кривые кипения насыщенной (1) и недогретой (2- $T_{нт}=6$ К, 3- 10 К) жидкости в условиях вынужденного течения (темные точки) и при погружении в большой объем (светлые) матричной поверхности.

Рис. 1



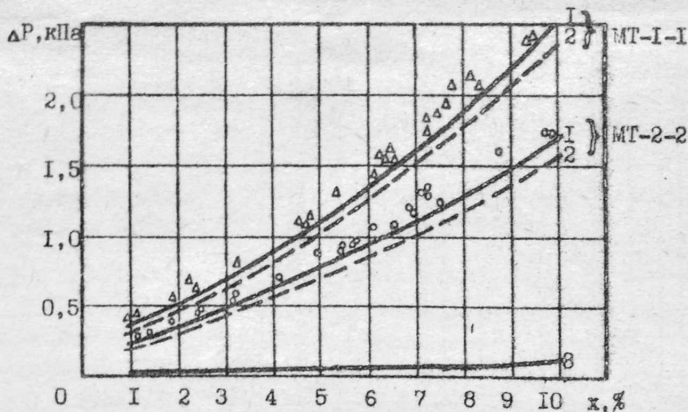
Влияние недогрева жидкости на интенсивность теплообмена при различных режимах кипения на матричной поверхности,

Рис. 2



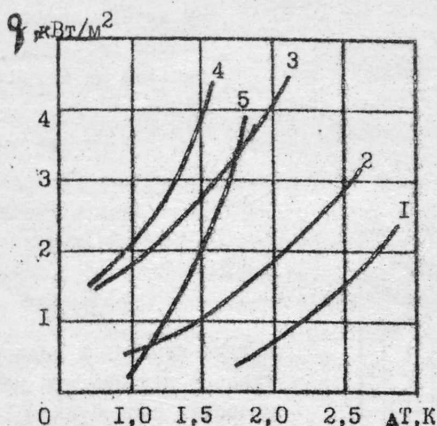
Кривые кипения в области конвективного кипения при различных массовых скоростях (1- $\dot{m}=33,1$; 2- $37,3$; 3- $51,1$; 4- $66,2$ кг/м²·с).

Рис. 3



Полные гидropотери при течении парожидкостного потока в моделях МТ с массовой скоростью $\dot{m} = 30,0 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (1), а также составляющие гидropотерь за счет ускорения (3) и трения (2)

Рис. 4



Кривые кипения кислорода на различных теплообменных поверхностях: 1 – гладкотрубные вертикальные с внутритрубным кипением; 2 – пластинчато-ребристые пакеты горизонтального типа; 3 – вертикальные трубки с пористым покрытием поверхности кипения и гладкой поверхностью конденсации; 4 – то же с оребренной поверхностью конденсации; 5 – матричная поверхность

Рис. 5

конструировании аппаратов матричного типа, а также разработана методика расчета данного типа аппаратов, при кипении в них теплоносителя.

Основные положения диссертации изложены в следующих печатных работах:

1. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысий О.А. Теплообмен при кипении жидкости на матричных поверхностях // Известия вузов. Машиностроение. - 1992. - № 7-9. - с. 87-89.

2. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысий О.А. Исследование теплообмена при кипении на матричных поверхностях из перфорированных пластин // Известия вузов. Машиностроение. - 1992. - № 10-12. - с. 67-70.

3. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысий О.А. Влияние недогрева на интенсивность теплообмена при кипении на матричных поверхностях // Известия вузов. Машиностроение. - 1993. - № 3.

4. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысий О.А. Теплообмен при кипении на матричных поверхностях из перфорированных пластин // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1993. - № 3.

 25.06.93

17

Подписано в печать 16.09.93.

Зак. 506

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Ротапринт МГТУ
