

На правах рукописи



Шевич Юрий Артемьевич

УДК 621.1.016

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ МАТРИЧНОГО И ПЛАНАРНОГО ТИПОВ
ДЛЯ КОМПАКТНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ И УСТАНОВОК**

Специальность 05.04.03. Машины, аппараты и процессы
холодильной и криогенной техники, системы
кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор О.К. Красникова

доктор технических наук,
профессор В.Н. Афанасьев

технических наук,
др А.Л. Сулис

У1827480

Веду

Шевич Ю.А.

ш", г. Балашиха Моск. обл.

Разработка и исследование
час. высокоэффективных
Моск теплообменных аппаратов
им. Н. матричного и планарного т...
корпус 2008 0-00

21 " мая 2008 года в 14³⁰
ого совета Д.212.141.16 при
техническом университете
Москва, Лефортовская наб., д. 1,
ние".

У1827480

отеке МГТУ

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

ных печатью
Москва, 2-ая
ного Совета

лаговременно
аций на имя

ГОСОЕ

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1827480

Шевич Ю.А. Разработка и ис

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокие требования к эффективности, компактности и надежности теплообменных аппаратов в современных установках низкотемпературной техники в сочетании с новыми уникальными технологическими достижениями позволили создать конструкции теплообменных аппаратов (ТА), которые по сути представляют новое поколение в их развитии.

Таковыми ТА являются высококомпактные матричные аппараты, теплообменная поверхность которых, матрица, представляет собой слоисто-пористый композиционный материал и миниатюрные планарные ТА с щелевыми микроканалами. Оба типа ТА образованы набором плоских элементов. Для матричных ТА это перфорированные пластины (ПП) или элементы, полученные из сеток. Количество ПП или сеток в матрице может быть от нескольких десятков до нескольких сотен и даже тысяч. Количество пластин в конструкции планарного ТА не велико – всего несколько штук, но не менее двух.

Конструкции обоих типов ТА могут быть изготовлены с помощью применения диффузионной сварки для надёжного соединения всех плоских элементов в прочную и герметичную конструкцию. Кроме того, для изготовления плоских элементов конструкций обоих ТА применяется высокоточная штамповка, а также процессы электрохимического травления в сочетании с фотолитографией. Применение таких технологических процессов при изготовлении плоских элементов позволяет создавать совокупность микроканалов со строго заданными геометрическими параметрами.

Применение диффузионной сварки практически исключает отклонение размеров каналов от номинальных размеров, так как такой способ соединения элементов ТА в целостную прочную конструкцию не требует присадочных материалов, флюсов и припоев.

При создании современных эффективных ТА наиболее плодотворными оказались два подхода: первый - создание развитых теплообменных поверхностей (ТП) с малыми значениями эквивалентного диаметра, что позволяет увеличить компактность, т.е. теплопередающую поверхность в единице объема; второй - создание благоприятных гидродинамических условий течения теплоносителя по каналам ТП, обеспечивающих высокие значения коэффициентов теплоотдачи при умеренных гидравлических сопротивлениях.

При создании матричных и планарных ТА, так же как и при создании ряда других эффективных ТА, эти два подхода соблюдаются одновременно. Теплообменные поверхности этих ТА имеют высокую компактность (значения S достигают $3000 - 10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$), а эквивалентные диаметры каналов могут иметь значения меньше 1 мм. Форма и размеры каналов ТА создают эффективную маломасштабную турбулизацию теплоносителя, которая существенно уменьшает термическое сопротивление пограничного слоя.

Особенности конструкций матричных и планарных ТА позволили получить высокопрочные аппараты, способные работать при высоких давлениях теплоносителей, что делает их альтернативными широко распространенным трубчатым ТА. Еще одним достоинством матричных ТА, является низкая продольная тепло-

проводность стенок каналов матрицы, что приводит к уменьшению отрицательно-го влияния этого фактора на эффективность ТА, способных работать при высоких значениях теплового КПД (более 95 %).

Выполненные исследования соответствуют перспективным направлениям развития науки, технологий и техники РФ.

Цель работы. Создание высокоэффективных матричных и планарных теплообменных аппаратов нового типа для компактных криогенных систем и установок с применением современных технологий.

Задачи исследования.

1. Проектирование и изготовление матричных и планарных ТА с параметрами, превосходящими их альтернативные прототипы.

2. Разработка методов экспериментального исследования интенсивности теплопередачи и гидродинамического сопротивления в моделях матричных и планарных ТА. Создание экспериментальных установок для исследования интенсивности теплопередачи и гидродинамического сопротивления в моделях и образцах ТА в условиях вынужденной конвекции при стационарных и пульсирующих режимах течения однофазного теплоносителя, а также при вынужденном течении двухфазного (кипящего) теплоносителя.

3. Экспериментальные и теоретические исследования процессов теплопередачи и гидродинамического сопротивления в матричных и планарных ТА, систематизация и обобщение результатов исследований с целью создания методов оптимизационного проектирования этих типов ТА

4. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности перфорированной поверхности теплообмена, функционирующей в режиме вторичной поверхности (поверхности оребрения). Оптимизация геометрических параметров перфорированных пластин.

5. Оценка эффективности исследованных матричных поверхностей теплообмена, работающих в режимах рекуперативного и регенеративного теплообмена, по целевому показателю, учитывающему их тепловые, гидравлические и геометрические характеристики. Разработка метода и методики оценки эффективности поверхностей теплообмена по целевому показателю. Техничко-экономическая оценка эффективности матричных ТА.

6. Исследование влияния температурного уровня и вторичных факторов на массогабаритные характеристики матричных ТА.

7. Разработка метода оптимизационного проектного расчёта матричных ТА.

8. Численное и экспериментальное исследование интенсивности теплообмена и гидродинамического сопротивления в микроканалах планарных ТА.

9. Испытания матричных и планарных ТА в составе систем и установок, работающих в различных диапазонах температур (4,5...550 К); определение прочностных характеристик матричных ТА в условиях воздействия перегрузок различного характера.

10. Формирование технологических требований к конструкциям матричных и планарных ТА, поиск новых технологических приемов для изготовления матричных ТА.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- получен большой массив новых экспериментальных данных по интенсивности теплообмена и гидродинамическому сопротивлению при вынужденном течении теплоносителя в матричных поверхностях теплообмена, состоящих из мелких плетёных металлических сеток и перфорированных пластин, обладающих высокой компактностью (до $10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и более), имеющих широкий диапазон геометрических параметров ($D_3=0.06...7 \text{ мм}$; $d_{\text{ш}}=0.04...5.5 \text{ мм}$; $d_0=0.6...2 \text{ мм}$; $\delta=0.155...1.0 \text{ мм}$) и параметров течения газообразного теплоносителя ($Re=10...2000$); впервые исследованы стабилизация теплообмена по высоте сетчатой матрицы и значения турбулентных пульсаций потока на входе и выходе из матрицы;
- получены новые экспериментальные данные по интенсивности теплообмена при кипении теплоносителя (воды) в матрицах из перфорированных пластин в условиях естественной конвекции и при вынужденном течении теплоносителя; определены значения критической плотности теплового потока;
- впервые изготовлены и исследованы новые конструкции планарных микротеплообменников из металлических пластин с щелевыми каналами глубиной $0.15...0.25 \text{ мм}$ различной формы и размеров; получены новые данные по интенсивности теплообмена и гидродинамическому сопротивлению в каналах планарных микротеплообменников с использованием численного и экспериментального методов исследования;
- в результате теоретических и экспериментальных исследований получены новые данные по эффективности перфорированного плоского ребра с одномерным и двумерным температурным полем при постоянной по сечению канала температуре набегающего потока и в условиях деформации профиля температуры набегающего потока предшествующими перфорированными пластинами;
- получены новые данные по оценке относительной эффективности матричных и других высокоэффективных поверхностей теплообмена (трубчатых витых и пластинчато-ребристых) с использованием разработанной методики, целевой функцией которой являются относительный объём (размеры) или относительный тепловой поток, передаваемый теплообменной поверхностью;
- впервые получены данные по оптимизации геометрических параметров (в пределах $d_0=0.5...8 \text{ мм}$, $\delta=0.5...2 \text{ мм}$, $r=0.25...0.75$) перфорированной пластины, являющейся теплопередающим элементом матрицы работающим в режиме ребра;
- впервые выполнены исследования и испытания опытных образцов матричных и планарных теплообменников в составе низкотемпературных установок при температурах $T \geq 4,5 \text{ К}$, и в других энергетических установках при $T \leq 523 \text{ К}$;
- впервые выполнены технико-экономические исследования матричного теплообменника и получена новая информация по оценке его эффективности, которая определялась с учётом затрат за весь жизненный цикл, включая затраты на НИОКР, себестоимость изготовления, стоимость провоза единицы массы, стоимость обслуживания для его изготовления и с учётом ресурса эксплуатации.

Практическая значимость работы.

- 1) Созданы 4 экспериментальных установки (стендов) для исследования теплогидравлических характеристик большого количества технологических, экспери-

ментальных и опытных образцов матричных и планарных теплообменников, конструкции которых защищены патентами и авторскими свидетельствами.

2) Впервые разработаны, изготовлены и испытаны в составе новой техники матричные и планарные теплообменники, созданные с применением диффузионной сварки в вакууме.

3) Разработаны и апробированы методики и программы оптимизационного проектирования матричных теплообменных аппаратов из перфорированных пластин для гелиевого ожижителя ОГ-25.

4) Результаты исследований теплообмена и гидродинамического сопротивления в матрицах из сеток и перфорированных пластин обобщены и представлены в безразмерном виде, удобном для практического применения при проектировании матричных теплообменников с однофазными теплоносителями для компактных криогенных установок.

5) Результаты исследований по теплообмену при кипении теплоносителя в матрицах из перфорированных пластин при естественной и вынужденной конвекции обобщены в широком диапазоне режимных параметров и могут быть применены при проектировании испарителей нового типа.

6) Разработана методика и определена относительная эффективность 17-ти теплообменных поверхностей разных типов (трубчатые витые, пластинчато-ребристые, матричные), показана высокая эффективность матричных поверхностей теплообмена.

7) При создании новых конструкций матричных и планарных теплообменников применены процессы и способы высоких технологий доступные для реализации в промышленном использовании при серийном изготовлении теплообменников такого типа.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов теплообмена и гидродинамики при течении однофазного теплоносителя в теплообменных аппаратах нового поколения матричного и планарного типов.

2. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена и гидродинамики при кипении воды в канале с матричной поверхностью теплообмена из перфорированных пластин при вынужденном течении теплоносителя и при естественной конвекции.

3. Способы реализации интенсификации теплообмена в матрицах из сетки и перфорированных пластин путем секционирования элементов матрицы и применением комбинированного расположения перфорированных пластин в матрице.

4. Результаты теоретических и экспериментальных решений задач по определению эффективности плоского перфорированного одиночного ребра треугольной формы, а также ребра, функционирующего в условиях, когда температура потока омывающего ребро, не является постоянной по сечению канала.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований интенсивности теплообмена и гидродинамического сопротивления в микроканалах планарных теплообменников.

6. Метод оценки эффективности рекуперативных и регенеративных поверхностей теплообмена с помощью относительных показателей (объемного и теплового) и

результаты оценки эффективности применительно к матричным и другим поверхностям теплообмена.

7. Результаты оценки технико-экономической эффективности матричного рекуперативного теплообменника, работающего в авиационной энергетической системе.

8. Результаты испытаний опытных образцов матричных и планарных теплообменников в составе криогенных установок и устройств, а также в составе других систем с теплоэнергообменом.

9. Методология расчета высокоэффективных теплообменных аппаратов для криогенных установок с учетом влияния вторичных факторов (продольная теплопроводность стенок каналов, теплоприток из окружающей среды, неравномерность расхода теплоносителя в каналах теплообменника).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: международных конференциях "Cryogenics" (Брно, Чехия, 1992 г., Прага, 1998, 2002 гг., Киев, Украина, 1992 г.); Международном симпозиуме "New Developments in Heat Exchangers" (Лиссабон, Португалия, 1993 г.); 19 международном конгрессе по холоду (Гаага, Нидерланды, 1995 г.); Международном семинаре "Thermal Science Seminar" (Блед, Словения, 2000г.); Международных конференциях "Слоистые композиционные материалы" (Волгоград, Россия, 1998, 2001, 2004 гг.); Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, Россия, МЭИ, 1994, 1998, 2006 гг.); Второй научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, МАИ, ОАО "ОКБ Сухого" 2004 г.); научных конференциях МГТУ им. Н.Э. Баумана (1995, 1998, 2000 гг.); научных семинарах МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре "Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения" в течение 1990-2007 гг.

Публикации. Общее количество работ, опубликованных по теме диссертации - 98, в том числе: 1 монография в соавторстве с проф. Е.И. Микулиным, разделы в 3 учебниках, 31 статья в научных журналах, 17 статей в сборниках научных трудов, 29 докладов в трудах международных и российских конференций, 13 авторских свидетельств, 4 патента.

Личный вклад автора. Постановка научных задач экспериментальных и теоретических исследований. Решение основных методических, теоретических и практических вопросов, построение расчетных моделей и алгоритмов. Расчет и проектирование экспериментальных стендов и установок, выбор режимов и способов измерений и проведение экспериментов. Сбор, анализ и обработка результатов исследований. Разработка конструкций экспериментальных моделей матриц, матричных и планарных теплообменников. Разработка способов интенсификации теплообмена в аппаратах этого типа. Автору также принадлежат: экспериментальные данные по теплообмену и гидродинамическому сопротивлению во всех исследованных сетчатых матрицах, матрицах из перфорированных пластин и в микроканалах планарных теплообменников; способы замеров малых разностей температур между поверхностью и теплоносителем, способы измерения температурных полей и их визуализация, способы генерации тепла в исследованных сетчатых матрицах и в моделях матриц из ПП при исследовании процесса кипения

воды. Автор лично участвовал во всех экспериментальных, аналитических и численных исследованиях. Изготовление всех экспериментальных моделей теплообменных поверхностей и опытных образцов теплообменников осуществлялось в МГТУ им. Н.Э. Баумана при непосредственном участии автора и при сотрудничестве со специалистами НПО "Наука" во главе с проф. Ворониным Г.И. (г. Москва), "Ниихиммаш" (г. Москва), НПО "Кислородмаш" (г. Одесса), ВГТУ (каф. сварки, доцент Кривенцов А.Н.) (г. Волгоград), НПО им. Лавочкина (г. Химки).

Работы, по материалам которых написаны ниже перечисленные разделы, выполнены в соавторстве: раздел 3.2. с к.т.н. Потаповым В.Н., раздел 3.4. с к.т.н. Лысым О.А., раздел 3.5. и 4.4 с зав. лабораторией сварки и пайки НПО "Кислородмаш" Веселовым В.А., разделы 4.2 и 4.3 с к.т.н. Михайловым А.В., раздел 4.4. с к.т.н. Даниленко Т.К., зав. лабораторией Соловьевым Н.А., раздел 5.3 с к.т.н. Балаклейским С.Н. Комплекс настоящих исследований был начат под руководством профессора, д.т.н. Е.И. Микулина и завершен при поддержке зав. кафедрой, д.т.н. А.М. Архаровым.

Внедрение. Результаты работы внедрены: при совершенствовании конструкций регенераторов криогенных газовых машины в г. Кирово-Чепецке на предприятии п/я А-1619; при замене трубчатого топливно-масляного теплообменника ТТМ6981 на матричный теплообменник ТТМ6981А при испытаниях нового изделия на НИП "Мотор" в г. Уфе; при замене трубчатого-витого теплообменника дроссельной ступени в гелиевом рефрижераторе РГ-200 на матричный теплообменник в НПО "Криогенмаш"(г. Балашиха); при создании матричного подогревателя паров бензина в опытной установке для получения высокооктанового бензина на экспериментальной базе АО "Морские системы Сухого".

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, списка использованной литературы из 103 наименований и содержит 335 стр. основного текста, в том числе 183 рис., 28 таблиц и 4 приложения.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Отмечается, что матричные и планарные ТА следует отнести к новому поколению компактных высокоэффективных аппаратов, для изготовления которых применяются новые высокие технологии. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы, а также приведена структура диссертации.

В первой главе показаны научно-технические предпосылки создания высокоэффективных теплообменников нового типа для компактных низкотемпературных установок и систем. Показано, что матричные и планарные ТА в ряде случаев являются эффективной альтернативой известным ТА пластинчаторебристого и трубчатого типов. Обладая высокой прочностью матричные ТА могут работать при высоких давлениях обоих теплоносителей, до 25 МПа и выше. На рис.1 показаны области характеризующие компактность и рабочие давления основных типов низкотемпературных ТА.

Эти области имеют тенденцию располагаться вдоль осей графика, что

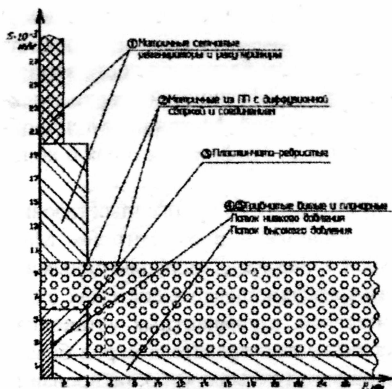


Рис. 1. Типы низкотемпературных ТА, их компактность и области рабочих давлений

отражает трудность сочетания таких важнейших показателей ТА, как высокая компактность и работоспособность при высоких давлениях теплоносителей. В определённой степени эта проблема решается с помощью матричных теплообменников изготовленных из медно-стальных элементов соединённых в единую, совместно с коллекторами, прочную конструкцию путём применения диффузионной сварки в вакууме.

Конструкционные схемы матричных ТА из перфорированных пластин и сеток показаны на рисунке 2, а планарного теплообменника прямоугольной формы на рисунке 3.

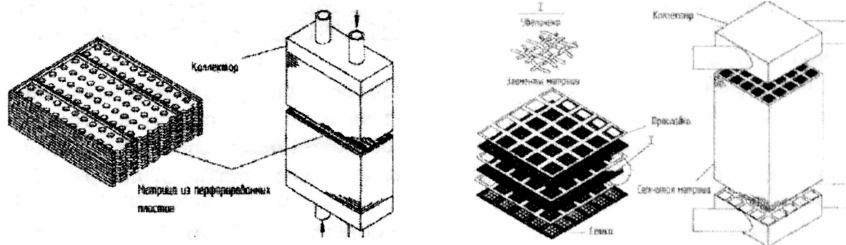


Рис. 2. Схемы конструкций матричных теплообменников из перфорированных пластин и из плетёной проволоочной сетки

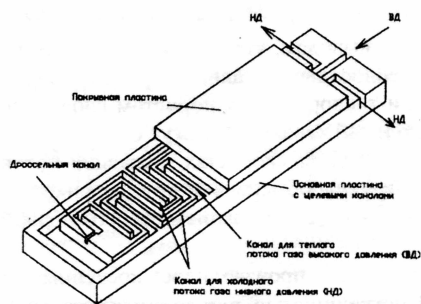


Рис. 3. Схема конструкции планарного теплообменника с щелевыми каналами для микрорефрижератора

Из описания конструкций матричных и планарных ТА следует, что эти аппараты принципиально отличаются от известных типов ТА. Появление этих новых типов ТА связано с повышенными требованиями к конструкциям современных ТА для низкотемпературной техники, особенно малогабаритной: высокая компактность поверхности теплообмена, высокая прочность и надёжность, минимальные габаритные размеры, технологичность и возможность

автоматизации технологических процессов и операций изготовления ТА, меньшие затраты на создание и эксплуатацию.

Создание новых конструкций ТА стало возможным благодаря достижениям современных технологий высокоточной штамповки, диффузионной сварки, электрохимического травления в сочетании с фотолитографией. Матричные теплообменники уже нашли применение в компактных гелиевых рефрижераторах с холодопроизводительностью 5...10 и более Вт.

Сетчатые регенеративные ТА много лет применяются в криогенных газовых машинах работающих по обратному циклу Стирлинга и в охладителях Мак-Магона – Гиффорда. В то же время, матричные ТА оказались перспективными и для применения в других энергетических установках, например в системах охлаждения масла современных авиационных двигателей, в компактных установках для получения высокооктанового бензина в качестве подогревателя паров бензина. Планарные ТА эффективны для применения в системах криостатирования элементов электронной техники с малыми тепловыделениями. Основными достоинствами планарных ТА для этой техники является то, что они имеют плоскую, тонкую (менее 1 мм) конструкцию.

В этой главе также количественно показано, что матричные поверхности по своей эффективности не уступают известным ТП пластинчато-ребристого и трубчатого типа.

Во второй главе приведены результаты исследований теплогидравлических характеристик в сетчатых матрицах. Анализ данных по теплообмену в матрицах из мелких сеток указывает на относительную общность между собой результатов, полученных в ряде одних исследований и очень сильное отличие от них данных, полученных в других работах.

Причиной расхождения данных по теплообмену явилось то обстоятельство, что в одних работах исследовались относительно короткие матрицы, в которых H/D_s не превышало 55, в то время как величина H/D_s для матриц исследованных в других работах достигало нескольких сотен. Многочисленные значения коэффициентов гидравлического сопротивления ξ в разных работах принципиально совпадают.

Анализ рассмотренных работ привёл к выводам, что отсутствуют надёжные зависимости для расчёта коэффициентов теплоотдачи в таких матрицах. Теоретические исследования движения жидкости и теплообмена в пористом слое, каким является сетчатая матрица, носят приближённый характер и могут быть получены при сильной идеализации структуры слоя и малых скоростях движения потока, поэтому для определения сопротивления и теплообмена в матрице приходится обращаться к экспериментальному материалу с использованием при его обработке методов теории подобия.

В большинстве исследований определение α производилось косвенным методом, который обладает возрастающей погрешностью при уменьшении массы матрицы (числа сеток в матрице). Во всех рассмотренных исследованиях степеней турбулентности потока на входе в матрицу не определялась. Также не установлено влияние изменения пористости матрицы за счёт зазоров между сетками на ин-

тенсивность теплообмена и сопротивления в ней. Эти данные нужны для расчета теплообменников-рекуператоров новой конструкции, находящих применение в криогенной технике. Отсутствуют также сведения и о влиянии периодической нестационарности движения потока через матрицу на её теплоотдачу и сопротивление. На рисунке 4 показаны схемы упаковки (расположения) сеток в матрице.

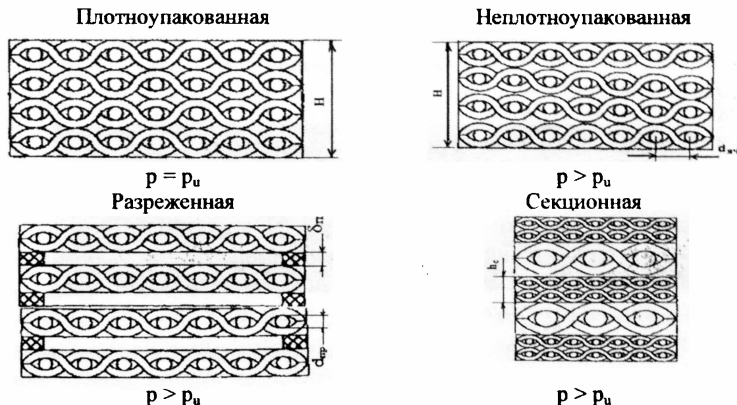


Рис. 4. Схема упаковки (расположения) сеток в матрице

Измерение степени турбулентности потока на входе $\epsilon_{вх}$ и выходе $\epsilon_{вых}$ из матрицы производилось нами с помощью термоанемометра постоянной температуры фирмы "DISA". В опытах применялись датчики из вольфрамовой проволоки с платиновым покрытием. Диаметр проволоки 5 мк, длина ~ 1 мм. Нити датчиков располагались нормально по отношению к потоку в центре канала, на расстоянии ~2,5 мм от крайних сеток на входе и выходе из матрицы. На рис. 5 дана схема размещения датчиков термоанемометра. На рис. 6 показан характер изменения степени турбулентности потока на входе и выходе из матриц с разным количеством сеток, т.е. с разными H/D .

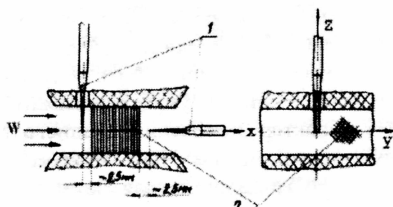


Рис. 5. Схема размещения датчиков термоанемометра в потоке на входе и выходе из матрицы

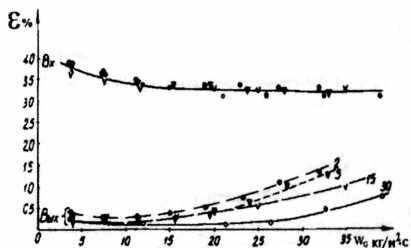


Рис. 6. Степень турбулентности потока на входе и выходе из матрицы: • - 2 сетки; ▽ - 5 сеток; v - 15 сеток; o - 30 сеток

Серия нижних кривых – это степень турбулентности потока на выходе из матрицы $\epsilon_{\text{вых}}$. Значения $\epsilon_{\text{вых}}$ при малых скоростях движения потока более, чем на порядок ниже значений $\epsilon_{\text{вх}}$. С увеличением скорости потока $\epsilon_{\text{вых}}$ увеличивается, причем, чем меньше сеток в пакете, тем выше значения $\epsilon_{\text{вых}}$. Детурбулизирующее действие сеток, т.е. выравнивание локальных скоростей турбулентных пульсаций по сечению демонстрирует рис. 7.

М-3Д (30 сеток)

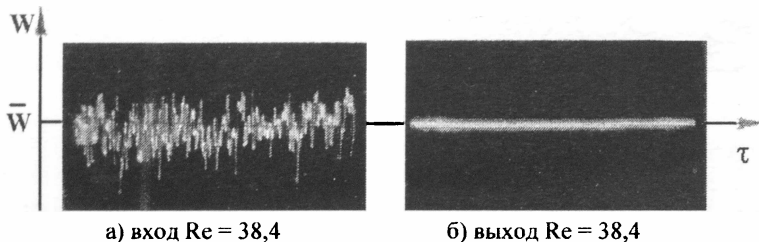


Рис. 7. Входные и выходные турбулентные пульсации стационарного потока

Активное взаимодействие входных слоев сеток с возмущённым потоком активизирует и процесс теплоотдачи в них по сравнению с глубинными слоями, которые не достигаются турбулентными пульсациями входящего в матрицу потока.

Исследовались матрицы из сеток с геометрически подобным плетением ($t/d_{\text{np}} = 2.29 \div 2.38$): № 004, № 0071 и № 0112. Материал проволоки - бронза. Геометрические параметры 19-ти матриц приведены в таблице 2 диссертации.

Полученные результаты показывают чёткое расслоение характеристик по теплообмену $Nu = f(Re)$ для матриц с разным числом сеток плотно упакованных в единый пакет, т.е. матриц различной относительной длины H/D_3 в направлении движения потока. С увеличением H/D_3 теплообмен в матрице протекает менее интенсивно. Максимальная теплоотдача имеет место для одной - двух сеток ($H/D_3 = 1,1 \div 2,4$). Значения относительной длины матрицы менялись в широком диапазоне: $H/D_3 = 1,1 \div 212$.

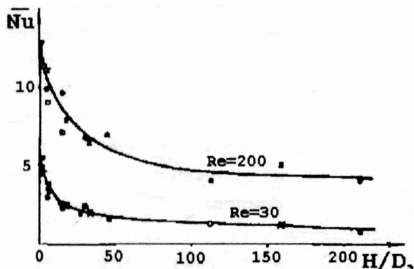


Рис. 8. Изменение числа Nu с увеличением H/D_3 матрицы: • - № 004; х - № 0071; о - № 0112

На рисунке 8 показан характер изменения среднего по длине числа Nu с изменением H/D_3 матрицы для двух значений числа Re .

С увеличением H/D_3 значения Nu асимптотически уменьшаются и приближаются к постоянному значению.

В результате обобщения получена безразмерная зависимость осредненных чисел Nu для матриц из плотно уложенных мелких сеток при значениях $H/D_3 = 2 \div 200$:

$$\overline{Nu} = 1,21 Re^{0,47} (H/D_3)^{-0,8/Re^{0,25}}. \quad (1)$$

Эта зависимость справедлива в диапазоне чисел $Re = 10 \div 500$. Максимальный разброс точек относительно аппроксимирующей прямой не превышает $\pm 20\%$. Анализ зависимости показывает, что изменение $\overline{\alpha}$ матрицы при увеличении её H/D_3 со 100 до 200 не превышает $10 \div 20\%$. С указанным отклонением можно принять, что для матриц с $H/D_3 \geq 100$ влияние входного участка на $\overline{\alpha}$ невелико и коэффициент теплоотдачи может быть определен по зависимости:

$$\overline{Nu} = 0,05 Re^{0,85}, \quad (2)$$

справедливой для того же диапазона чисел Re .

В разреженных матрицах $\overline{\alpha}$ несколько выше. Практически для определения значений $\overline{\alpha}$ в разреженных матрицах можно использовать зависимости (1) и (2), полученные для плотно упакованных матриц. Аэродинамическое сопротивление в разреженных матрицах также выше, чем в плотно упакованных. Имеющиеся экспериментальные данные позволили получить единые зависимости (3) для определения коэффициентов сопротивления в плотно упакованных и разреженных матрицах испытанного диапазона типоразмеров сеток при действительной пористости:

$$\text{для } 10 \leq Re \leq 40 \quad \xi = \frac{59}{Re^{0,74}} \left(\frac{p}{p_{ид}} \right)^{1,35}, \quad (3a)$$

$$\text{для } 40 \leq Re \leq 300 \quad \xi = \frac{19}{Re^{0,44}} \left(\frac{p}{p_{ид}} \right)^{1,35} \quad (36)$$

Уравнения (3) применимы для матриц с $H/D_3 \geq 15 \div 20$. В диапазоне $p = 0,66 \div 0,855$ максимальный разброс точек по отношению к аппроксимирующим прямым не превышает $\pm 4\%$ для уравнения (3a) и $\pm 7\%$ для уравнения (36). В уравнениях (3) число Re определяется по параметрам идеальной матрицы. Сетчатые матрицы, которые, исполняют роль насадки регенератора газовой холодильной машины, работают в условиях периодического, **пульсирующего** движения газа через них. Основными показателями такого режима движения потока являются: частота периодичности f , величина максимального колебания расхода ΔG и ускорение потока dG/dt , которое есть функция, зависящая от f и ΔG . Характер изменения расхода в модели имеет форму близкую к синусоидальной и частоту, соответствующую диапазону пульсаций теплоносителя в ГХМ $f = 10 \div 25$ Гц.

В качестве критерия нестационарности принята безразмерная величина $K = (dG/dt) \cdot D_3^2 / 16G \cdot v$. При моделировании важно, чтобы критерий нестационарности для регенератора K_p и модели K_m были величины одного порядка или рав-

ны. Диапазон критерия нестационарности для регенераторов ГХМ – $K_p = 0 \div \pm(1 \div 3,0) \cdot 10^{-3}$. В модели – $K_M = 0 \div (\pm 1,4 \cdot 10^{-3})$.

Установка обеспечивала пульсационный режим движения потока воздуха через исследуемую матрицу при различных частотах и амплитудах колебания расхода и, следовательно, различных величинах ускорений.

Осциллограммы подтверждают периодическое изменение расхода (скорости) потока близкое к синусоидальной форме (рис. 9).

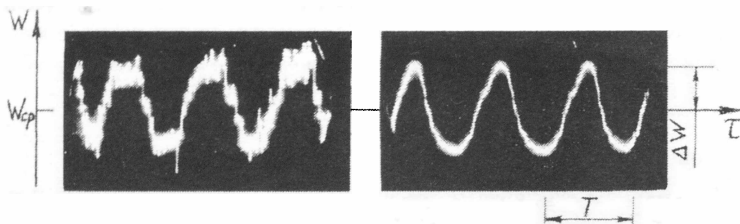


Рис.9 Осциллограммы пульсирующего потока на входе и выходе из матрицы модели М-3Д (30 сеток, $Re=33$, $A=23\%$, $f=25\text{Гц}$)

Интенсивность теплообмена в сетчатых матрицах при пульсирующем расходе потока потока одинакова с интенсивностью при стационарном режиме расхода. Расходная пульсация потока вдоль продольной оси матрицы имеет анизотропный характер и не вызывает пульсаций по двум другим ортогональным осям. Увеличение ξ матриц при пульсирующем потоке по сравнению со стационарным лежит в диапазоне $1,08 \div 1,45$ раза и связано в первую очередь с увеличением инерционной составляющей гидродотерь.

Установленное влияние относительной длины матрицы на интенсивность теплообмена в ней привело к реализации новой конструкции регенератора ГХМ. Была предложена конструкция регенератора с секционной насадкой (рис. 4). Особенность такой конструкции заключается в том, что относительная высота $H/D\phi$ каждой секции значительно (в несколько раз) меньше относительной высоты всей насадки. В целом интенсивность теплообмена в регенераторе увеличивается на $50 \dots 60\%$. Зазор между секциями может быть создан с помощью перфорированной прокладки или более крупной сетки. Регенератор с такой насадкой был внедрен на предприятии п/я А-1619 в г. Кирове-Чепецке в соответствии с нашим Авторским свидетельством № 615348 и последующим патентом. Аналогичное решение по повышению эффективности сетчатой насадки дано в Авторском свидетельстве N 419705, где предлагается разреженный вариант матрицы.

В **третьей главе** представлены результаты комплекса исследований теплообмена и гидравлического сопротивления в матрицах из перфорированных пластин с круглой и щелевой перфорацией при вынужденном течении однофазного теплоносителя и при кипении теплоносителя (воды) на матричной

Результаты исследований тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в таких матрицах только с круглой перфорацией, содержатся в рабо-

тах В.К. Орлова и С.А. Шевяковой, Н.С.Заблоцкой, В.В.Притулы, В.А.Веселова и А.А.Сотникова, Ю.Б.Коваль-Гука, В.М.Патрикеева и др.

На интенсивность процессов, протекающих в матрицах из ПП, существенно влияют геометрические характеристики пластин и матриц, в частности, взаимное расположение смежных ПП со смещением и без смещения или их комбинация, а также такие параметры, как зазор между ПП, пористость ПП и другие факторы.

На рис.10 показаны варианты упаковки смежных ПП в матрице.

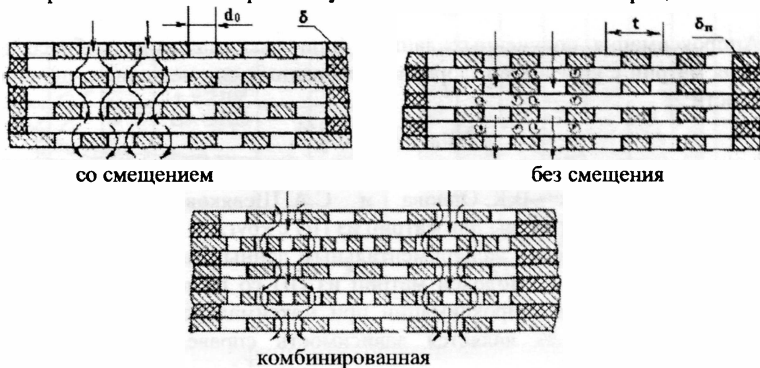


Рис. 10. Варианты расположения смежных ПП в матрице

На рис. 11 (линия 1) показаны экспериментальные данные по теплообмену матриц из ПП с круглой перфорацией, собранных со смещением.

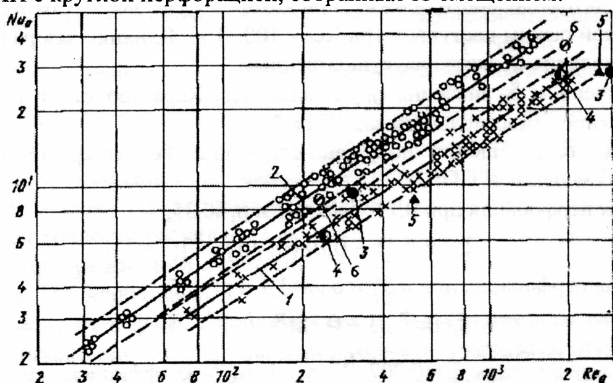


Рис. 11 Характеристики теплообмена матриц из пластин с круглой и щелевой перфорацией, собранных со смещением из пластин:
х - пластины ППК—ЗПК; о - пластины ППЦ—ЗПЦ

Типоразмер ПП	d, мм	t, мм	d _п , мм	p ₁	S _п , м ² /м	d _н , мм	δ _п , мм	S _н , м ² /м
1ПК	0,6	1	0,155	0,351	10800	0,6	0,11-0,88	6320-1620
2ПК	0,9	1,5	0,29	0,283	6204	0,9	0,15-0,9	4090-1513
3ПК	1,35	2,25	0,29	0,27	5785	1,35	0,15-0,9	3813-1430
1ПЦ	0,5	1	0,174	0,477	7947	0,484	0,11-0,77	4850-1460
2ПЦ	1	2	0,28	0,5	4638	0,882	0,11-0,88	3330-1120
3ПЦ	2	4	0,28	0,5	4138	1,58	0,15-0,9	2694-982

Примечание. ПК – пластины с круглой перфорацией; ПЦ – пластины со щелевой перфорацией.
значения d_п для щелевой перфорации соответствуют гидравлическому диаметру щели.

Нами экспериментально исследовано более 70 моделей матричных теплообменников, изготовленных из ПП с круглой и щелевой перфорацией шести типоразмеров (табл. 1).

Аппроксимация полученных данных (при максимальном разбросе точек ±14%) для матриц с круглой перфорацией, собранных со смещением, приводит к зависимости:

$$Nu_0 = 0,2 Re_0^{0,64}. \quad (4)$$

На рисунке 11 точки 3, 4, 5, 6 — данные по теплообмену, полученные соответственно в работах В.К. Орлова и С.А. Шевяковой, Н.С. Заблочки, В.М. Патрикеева, В.В. Прилулы для матриц из ПП с круглой перфорацией.

Линия 2 соответствует экспериментальным данным по теплообмену, полученным при испытании 12 моделей матриц из ПП со щелевой перфорацией со смещением. Результатом аппроксимации при максимальном разбросе экспериментальных точек ±15 % является зависимость справедливая в диапазоне $30 < Re_0 < 1600$:

$$Nu_0 = 0,22 Re_0^{0,69} \quad (5)$$

Гидродинамические характеристики матриц из ПП в основном соответствуют области автомодельного режима, при котором ξ_0 не зависит от Re_0 . Для матриц из ПП такой режим наступает при $Re_0 > 100...150$. Влияние зазора на коэффициент сопротивления ξ_0 оказалось существенным.

С увеличением $\delta_{п}$ значения ξ_0 уменьшались. Характеристики на рис. 12а,б отражают влияние относительного зазора на ξ_0 .

В результате обобщения получены следующие безразмерные зависимости для матриц со смещением ПП:

- круглая перфорация при $0,11 < \delta_{п}/d < 1,1$ и $p_1 < 0,35$,

$$\xi_0 = \xi_1 [1 + 0,08(\delta_{п}/d)^{0,8}]; \quad (6)$$

- щелевая перфорация при $0,075 < \delta_{п}/a < 1,1$ и $p_1 < 0,5$,

$$\xi_0 = \xi_1 [1 + 0,18(\delta_{п}/a)^{1,58}]. \quad (7)$$

В этих зависимостях $\xi_1 = (0,707 \sqrt{1 - p_1} + 1 - p_1)^2$ - коэффициент сопротивления одиночной ПП.

Для матриц без смещения ПП получены следующие безразмерные зависимости:

- для ПП с круглой перфорацией при $0,11 < \delta_{п}/d < 1$ и $Re_0 = 200...1000$:

$$Nu_0 = 0,065 Re_0^{0,74} (\delta_{п}/d)^{0,21}, \quad (8)$$

- для ПП с щелевой перфорацией при $0,075 < \delta_{п}/a < 0,88$ и $Re_0 = 200...1400$:

$$Nu_0 = 0,045 Re_0^{0,87} (\delta_{II}/a)^{0,5}, \quad (9)$$

- по гидравлическому сопротивлению для ПП с круглой перфорацией:

$$\xi_0 = 0,78 (\delta_{II}/d)^{0,5}, \quad (10)$$

- для ПП с щелевой перфорацией при выше отмеченных ограничениях:

$$\xi_0 = 0,44 (\delta_{II}/a)^{0,72}. \quad (11)$$

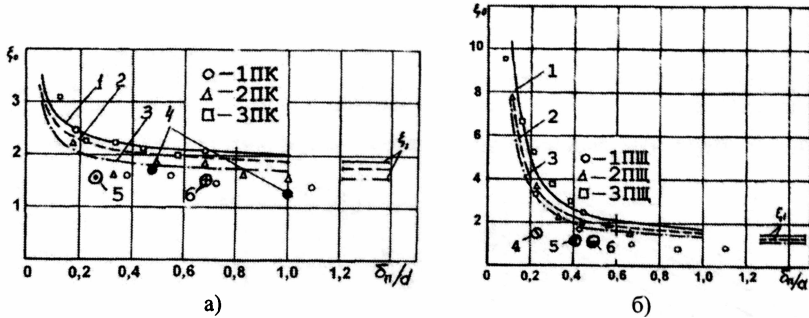


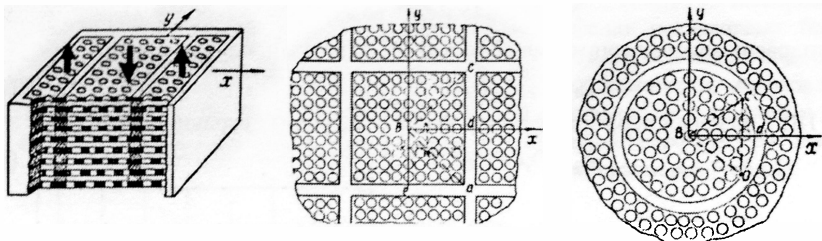
Рис. 12. Зависимость коэффициента сопротивления матриц с круглой и щелевой перфорациями от относительного зазора и пористости p_1 :

- а) линии - расчет по зависимости (6); точки - экспериментальные данные;
 1- $p_1 = 0,27 (f = 0,243)$; 2- $p_1 = 0,283 (f = 0,255)$; 3- $p_1 = 0,351 (f = 0,324)$; 4 - НПО "Криоген-маш"; 5, 6 — данные для комбинированных матриц типа 2ПК и 3ПК;
 б) линии - расчет по зависимости (7), точки - экспериментальные данные;
 1- $p_1 = 0,5 (f = 0,36)$; 2 — $p_1 = 0,5 (f = 0,417)$; 3 — $p_1 = 0,477 (f = 0,45)$;
 4, 5, 6 — данные для комбинированных матриц типа 2 ПЩ и 3 ПЩ

Интенсивность теплообмена в комбинированных матрицах выше, чем в матрицах, выполненных без смещения и почти совпадает с данными для матриц, выполненных со смещением. Коэффициент сопротивления для комбинированных матриц существенно в 1,3 - 2,5 раза меньше, чем для матриц со смещением.

Высокая точность расчёта МТ во многом определяется точностью расчётов **эффективности оребрённой поверхности**, которая образована ПП. Для расчётов КПД рёбер из ПП необходимо знание температурных полей ПП. Температурное поле ПП зависит от формы, размеров каналов и их взаимного расположения по сечению матрицы (рис. 13). Влияние перфорации учитывают путем введения в формулу параметра ребра m дополнительных коэффициентов Φ и B , учитывающих изменение теплообменной поверхности и термической проводимости ребра, т.е. $m = \sqrt{(2\alpha\Phi/\lambda\delta B)}$.

При шахматном расположении каналов по сечению теплообменника, перфорированные пластины имеют двумерное температурное поле по сечению каналов. Изотермы поля располагаются в виде "концентричных" квадратов со сторонами, параллельными основанию ребра. Тогда для определения температурного поля перфорированной пластины достаточно знать распределение температуры по высоте bd треугольного элемента abc , в пределах которого поле можно рассматривать как одномерное (рис. 13б, 14.).



а) параллельное расположение каналов

б) шахматное расположение каналов

в) концентричное расположение каналов

Рис. 13. Варианты расположения каналов в матричном теплообменнике

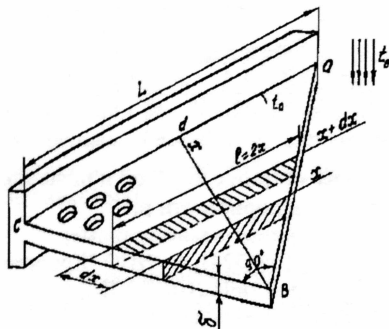


Рис. 14. Расчётный элемент перфорированного ребра при шахматном расположении каналов

Последующая экспериментальная проверка подтвердила это предположение. В качестве термоминдикаторов применялись как микротермопары, так и жидкие холестерические кристаллы с диапазоном рабочей температуры $t_{\text{раб}} = 28 \div 32^\circ\text{C}$ и чувствительностью до $0,05^\circ\text{C}$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности тонкого треугольного ребра с одномерным температурным полем:

$$x \cdot d^2t/dx^2 + dt/dx + m^2x(t_B - t) = 0, \quad (12)$$

где t и x - температура и координата сечения ребра, отсчитываемая от вершины ребра.

После замены переменной получаем модифицированное уравнение Бесселя, которое трансформируется в стандартную форму уравнения с известным решением путем замены действительной переменной на мнимую imx . Общее решение уравнения имеет вид:

$$y = C_1 I_0(mx) + C_2 K_0(mx), \quad (13)$$

где $I_0(mx)$ и $K_0(mx)$ - модифицированные функции Бесселя первого и второго рода (соответственно) нулевого порядка; C_1 и C_2 - постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

Продифференцировав уравнение (13) и определив C_1 и C_2 получим решение дифференциального уравнения теплопроводности тонкого треугольного ребра. На

основании этого решения получим уравнение, характеризующее закон распределения температуры по тонкому треугольному ребру с углом при вершине ребра $\varphi = 90^\circ$ и основанием ребра длиной L и в результате получаем зависимость для определения эффективности такого ребра:

$$\eta_p = \frac{2}{mL/2} \cdot \frac{I_1(mL/2)}{I_0(mL/2)}, \quad (14)$$

где $I_0(mL/2)$ и $I_1(mL/2)$ – модифицированные функции Бесселя.

Сопоставление расчетных, по зависимости (14), и экспериментальных значений эффективности тонкого треугольного перфорированного ребра показано на рисунке 15.

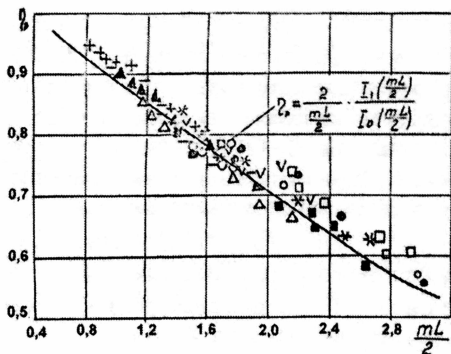


Рис. 15. Расчетная кривая по зависимости (16) и экспериментальные значения эффективности тонкого треугольного перфорированного ребра

Результаты приведенных выше исследований были получены для случая одиночной пластины при условии постоянной по сечению канала температуры набегающего на нее потока воздуха. В таких условиях находится первая перфорированная пластина матрицы. В зазорах между ПП поток не успевает перемешиваться и температура потока после первых перфорированных пластин начинает изменяться по сечению канала, повторяя характер температурного поля перфорированной пластины. В пределе разность температур между потоком воздуха t_b и ребром t стремится к постоянной по длине ребра.

Исходным дифференциальным уравнением теплопроводности тонкого треугольного ребра в этом случае также является уравнение (12), в котором разность температур $(t_b - t)$ принимается постоянной величиной.

В результате решения этой задачи получена зависимость для определения эффективности тонкого треугольного перфорированного ребра при постоянной разности температур между потоком и ребром по его длине:

$$\eta_p = \left(1 + \frac{m^2 (L/2)^2}{6} \right)^{-1}$$

М Г Т У⁽¹⁵⁾
им. Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

Одним из основных условий получения эффективной конструкции ТА является использование ПП с обоснованными геометрическими параметрами такими как: доля свободного сечения ПП p (пористость), диаметр отверстий перфорации d и толщина пластины δ . Для определения оптимальных значений величин этих параметров применён объёмный относительный показатель $V = v_2 / v_1$, где v_2 - объём сравниваемой теплообменной поверхности, v_1 - объём базовой поверхности, относительно которой ведётся сравнение. Применение показателя V позволяет одновременно учесть интенсивность теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, компактность и эффективность ПП функционирующей в режиме вторичной поверхности. Поверхность, имеющая меньшее значение V , более эффективна. О показателе V подробнее изложено в главе 5.

Для анализа выбраны ПП с круглой перфорацией и диаметром отверстий перфорации 0,5; 1; 2; 4 и 8 мм. Диапазон толщин $\delta = 0,125 \div 2$ мм, причем ряду размеров отверстий перфорации соответствовало три варианта толщины пластины: $\delta = d$; $\delta = d/2$; $\delta = d/4$. Пористость изменялась в диапазоне 0,25...0,75. Диапазон компактности анализируемых пластин $S = 313 \div 13900 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

При эффективности ребра меньше единицы значения объёмного относительного показателя могут быть определены по формуле:

$$V_n = (v_2/v_1) \cdot (\eta_1/\eta_2), \quad (16)$$

где η_1 и η_2 - эффективности ребер сравниваемых ПП.

Принято, что: при $n = 1$ и $m = -1$ — ламинарный режим и $V_m = V_{ml}$.

при $n = 1$ и $m = 0$ — турбулентный режим и $V_m = V_{mt}$

В результате получены значения объёмного относительного показателя для 45 типоразмеров перфорированных пластин на двух режимах течения теплоносителя. Установлено, что оптимальное значение пористости ПП при обоих режимах течения соответствует $p=0,5$, а влияние параметров d и δ на эффективность ПП показано на рис.16.

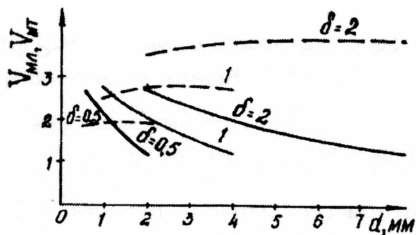


Рис. 16. Влияние диаметра отверстия перфорации d и толщины ПП δ на показатели V_{ml} и V_{mt} при турбулентном (---) и ламинарном (—) режимах при $p=0,5$

Анализ особенностей высококомпактных испарителей с различными эффективными поверхностями теплообмена, включая и матричные позволил предположить высокую интенсивность теплообмена **при кипении** в последних. Цель исследований теплообмена в матричных теплообменниках при кипении теплоносителя - разработка инженерной методики расчёта интенсивности теплообмена и выработка рекомендаций по конструированию испарительных элементов с матричной поверхностью теплообмена.

Геометрические параметры исследованных моделей при кипении теплоносителя приведены в таблице 9 диссертации. Для исследования особенностей кипения на матричной поверхности были разработаны и изготовлены шесть моделей двух типов и экспериментальный стенд.

Экспериментальные данные по теплообмену для развитого пузырькового кипения при естественной конвекции описаны зависимостью:

$$\alpha_{\text{кип}} = A^* \cdot q^{0,7}, \quad (17)$$

где коэффициент $A^* = 13,44$ одинаков для всех исследованных моделей матриц.

При $q > 300$ (кВт/м²) возникающие паровые пузыри запирают канал, возникающий кризис теплообмена носит гидродинамический характер. Полученное значение плотности теплового потока является верхней границей применения соотношения (17). На рис. 17 представлены результаты полученные при различных массовых скоростях потока: $m = 28,9 \dots 104,3$ (кг/м²·с).

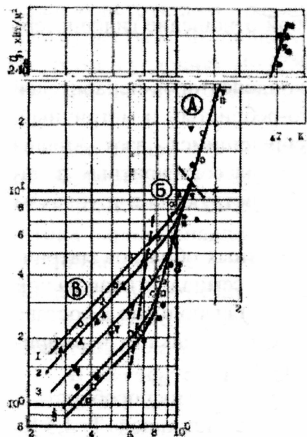


Рис. 17. Экспериментальные данные по кипению воды на матричной поверхности в условиях вынужденного течения: 1 - $m = 104,3$; 2 - $m = 83,0$; 3 - $m = 58,3$; 4 - $m = 32,5$; 5 - $m = 28,9$ кг/м²·с

При этом в области "А" преобладающий механизм теплообмена - пузырьковое кипение ($\alpha \sim q^{0,7}$, $\alpha \neq f(m)$), а в области "В" - вынужденная конвекция ($\alpha = f(m)$). В области "Б" - вклад обоих механизмов теплообмена соизмерим. Интенсивность теплообмена в области "Б" может быть рассчитана по соотношению аналогичному формуле С.С. Кутателадзе:

$$\alpha / \alpha_{\text{вк}} = \sqrt{(\alpha_{\text{кип}} / \alpha_{\text{вк}})^2 + 1}, \quad (18)$$

основанному на принципе суперпозиции двух независимых механизмов теплоотдачи. Предлагаемые соотношения позволяют обобщить с точностью $\pm 20\%$ практически все экспериментальные данные, полученные при кипении насыщенной жидкости в канале матричного типа в условиях вынужденной конвекции. Расчёт интенсивности теплообмена в условиях кипения недогретой жидкости при естественной конвекции и вынужденном течении, как показали исследования, следует рассчитывать по зависимости (17), в которой значения коэффициента $A^* = M - a \Delta T_{\text{нг}}$, где M

и a зависят от величины недогрева $\Delta T_{\text{нг}}$ в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2.

Режим теплообмена при кипении	$\Delta T_{\text{нг}}$, К	M	a
частичное поверхностное	6,8...34	7,57	0,133
развитое поверхностное	0...6,8	22,4	2,33

развитое пузырьковое	0	22,4	0
----------------------	---	------	---

Для кипения при вынужденной конвекции и заданном паросодержании на входе также получены экспериментальные данные которые обобщены и представлены зависимостью:

$$\alpha/\alpha_{\text{БК}} = 7,25 (1/\chi_{\text{т}})^{0,5}. \quad (19)$$

Здесь $\chi_{\text{н}}$ - параметр Мартинелли-Локкарта, $\alpha_{\text{БК}}$ - коэффициент теплоотдачи определяемый по формуле (4) для вынужденной конвекции однофазного теплоносителя. Зависимость (19) справедлива для массовых скоростей $m = 28,9 \dots 104,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и средних паросодержаниях $X = 0 \dots 8\%$ (паросодержание на выходе из модели достигало 13%).

Гидропотери двухфазного потока в матрице в основном зависят от вязкостно-инерционной составляющей, которая может быть определена по зависимости:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ж}} \cdot \left(1 + C/\chi_{\text{т}} + 1/\chi_{\text{т}}^2\right), \quad (20)$$

где $C=20$; комплекс $\left(1 + C/\chi_{\text{т}} + 1/\chi_{\text{т}}^2\right)$ представляет собой отношение гидропотерь при течении парожидкостного потока и при течении жидкости.

По результатам исследований выполнен расчёт конденсаторов-испарителей для ВРУ трёх типов: пластинчато-ребристый, трубчато-ребристый и матричный. Кипящим теплоносителем являлся кислород, а конденсирующимся - азот. Анализ расчётов показал, что матричная конструкция аппарата по массогабаритным показателям в 10 раз, а масса в 4,5 раза меньше аналогичной конструкции в трубчатом исполнении.

В разделе 3.5 приведены результаты испытаний опытных образцов матричных ТА в различных установках и системах. Испытание семнадцатиканальной конструкции матричного теплообменника (фото на рис. 18а) выполнено в составе гелиевой криогенной установки РГ-200, работающей в ожижительном и рефрижераторном режимах стенда КС 0405 (НПО "Криогенмаш").

Испытания матричного теплообменника показали его работоспособность в ступенях окончательного охлаждения при температуре достигающей $T=4,5 \text{ К}$. Успешные испытания теплообменника в составе гелиевого рефрижератора РГ-200 сделали целесообразным выполнение расчётного анализа массогабаритных характеристик всех теплообменных аппаратов гелиевого ожижителя ОГ-25 трех разных типов: пластинчато-ребристых, трубчатых витых, матричных из перфорированных пластин. Анализ показал, что с понижением температурного уровня четче выявляются габаритные преимущества матричного теплообменника.

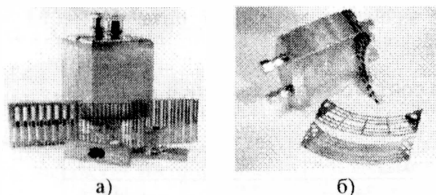


Рис.18. Медно-стальные матричные теплообменники и их элементы:

- а)-семнадцатиканальный и
- б)-пятиканальный

Сравнение теплообменников по габаритным показателям показывает, что трубчатые-витые и матричные теплообменники обеспечивают примерно одинаковые размеры высокоэффективных аппаратов. Однако, низкотемпературные теплообменники в матричном исполнении существенно меньше трубчатых по всем размерам.

Матричные теплообменники намного меньше трубчато-витых и по массе. Массы их матриц почти в 2 раза меньше массы навивок соответствующих трубчатых витых аппаратов (см. табл. 17-20 диссертации). В реальных конструкциях с коллекторами это отличие будет несколько меньше, но и в этом случае преимущества массогабаритных характеристик матричных аппаратов очевидны.

Испытания пятиканального матричного теплообменника (рис.18б) предназначенного для работы в системе охлаждения масла авиационного двигателя при давлениях теплоносителей до 12 МПа проводились в НПО "Наука" и НПП "Мотор" (г.Уфа). Показаны преимущества конструкции матричного теплообменника перед конструкцией традиционно применяемого трубчатого аппарата. Главным преимуществом матричного ТА явилось и то, что он обладает неограниченным ресурсом в условиях воздействия таких перегрузок как: вибрации, удар, циклические изменения температуры, воздействие влажности, усталостная прочность и др.

По заказу АО "Морские системы Сухого" были изготовлены и испытаны подогреватели паров бензина в установках риформинга бензина. В соответствии с технологическим процессом требовалось осуществлять подогрев потока паров бензина до температуры 200...400 °С. При ограниченном температурном напоре между поверхностью нагрева и потоком (не более 50 °С). Мощность подогревателя 45 кВт.

Опытные образцы подогревателей были изготовлены в НПО "Кислород-маш"(г.Одесса) и испытаны в АО "Морские системы Сухого".

В четвёртой главе представлены результаты исследований связанные с разработкой конструкций, методами расчёта и испытаниями технологических и опытных образцов планарных теплообменников для микрокриорефрижераторов. Применение традиционных конструкций микрокриорефрижераторов с трубчатыми теплообменниками для охлаждения элементов электронной техники вызывает сложности, связанные с их компоновкой в составе электронного узла (платы). Более перспективной оказалась плоская конструкция микрокриорефрижератора, реализация которой стала возможной в случае применения нового типа микротеплообменника, получившего название планарного теплообменника, а сам микрокриорефрижератор с таким теплообменником получил название планарный микрокриорефрижератор. Размеры каналов в планарном микротеплообменнике: ширина 50...500 мкм, глубина 20...100 мкм.

На рис. 19а, 19б показаны схемы конструкций планарного прямоугольного и дискового микрокриорефрижераторов, соответственно, с каналами зигзагообразной и спиральной формы. Успешное проектирование планарных ТА зависит от многих факторов. Однако доминирующим является точность расчётов процессов теплообмена и гидравлического сопротивления, протекающих в их микроканалах. Формы и размеры микроканалов отличаются большим многообразием.

В работе выполнено численное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в микроканалах простой и сложной формы (периодические повороты на 90° и 180° , спиральная форма, расширяющиеся прямые каналы и др.)

Численный метод исследования базируется на решении системы уравнений: неразрывности, движения и энергии, описывающих стационарное ламинарное движение ньютоновской жидкости при параболических течениях в декартовой прямоугольной системе координат. Рассматривалось течение газа в прямолинейном канале и в каналах сложной геометрической конфигурации, размеры и формы которых соответствуют каналам реальных конструкций планарных теплообменников. При решении задачи учитывалась неизотермичность газа в поперечном сечении канала. В качестве законов распределения температуры стенки по длине канала принимались различные варианты: линейный и экспоненциальный. Для решения указанной системы уравнений использовался программный комплекс ТСПТ (трехмерные стационарные параболические течения) разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана (каф.Э-6).

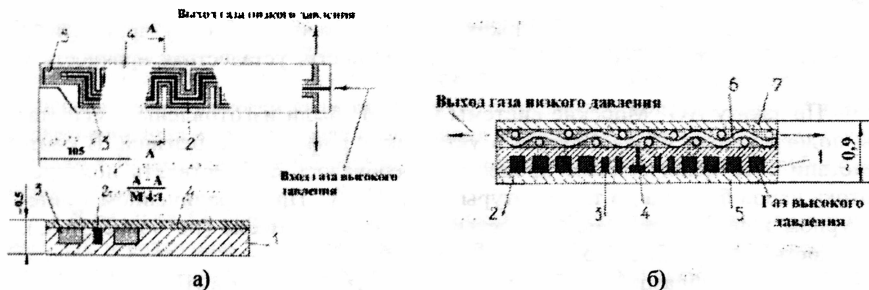


Рис. 19. Схемы конструкций ПМР прямоугольной и дисковой формы с зигзагообразными и спиральными каналами:

- а) 1 - основная пластина с каналами; 2 - канал высокого давления; 3 - два канала низкого давления; 4 - покрывная пластина; 5 - низкотемпературная зона;
- б) 1 - основной диск с каналом спиральной формы; 2 - спиральный канал высокого давления; 3 - дроссельный канал; 4 - перепускное отверстие; 5, 7 - покрывные пластины; 6 - канал низкого давления, заполненный проволоочной сеткой

Для случая канала с поворотами производилось осреднение расчетных величин по прямолинейным участкам. Сложнее протекают процессы в канале спиральной формы (спираль Архимеда). Такую форму имеет канал высокого давления в дисковом планарном микрорефрижераторе. Под действием центробежной силы в движущемся газе возникают вихревые течения в поперечном сечении, что должно оказывать влияние на теплоотдачу и трение в канале. Сами центробежные силы также изменяются в зависимости от кривизны спирали. Сильное влияние на характер течения оказывают меняющиеся от температуры и давления свойства газа. На рис. 20а и 20б показан характер изменения коэффициентов теплоотдачи и трения от продольной координаты для течения азота по каналу с формой закручивающейся спирали при входном давлении 20 МПа и разных законах изменения

температуры стенки канала по длине: 1 - линейное, 2 - по закону $T(z) = 320 - 40 \exp(0,00896 z)$.

Размер канала и режимные параметры следующие:

высота (глубина) канала 0,5 мм; ширина канала 0,5 мм (т.е. $a/h=1$); скорость азота на входе в канал 0,2 м/с; температура газа на входе 300 К; температура стенки на входе 280 К; температура стенки на выходе 80 К.

Аналогичные расчётные значения локальных значений α и f получены для большого количества микроканалов с другими геометрическими формами и параметрами.

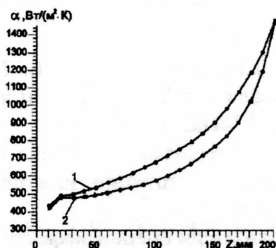


Рис.20а. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине закручивающегося спирального канала ($a/h=1$)

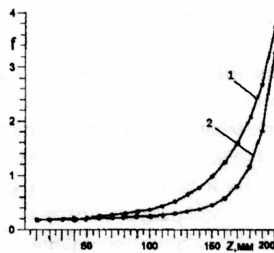


Рис.20б. Изменение коэффициента сопротивления по длине закручивающегося спирального канала ($a/h=1$)

Результаты численных исследований показали, что любая изогнутая форма микроканала интенсифицирует в два и более раза теплообмен по сравнению с прямым каналом, одновременно увеличивая потери на трение газа в канале; применение программного комплекса ТСПТ для численного исследования процессов теплообмена в микроканалах правомочно для многих частных случаев форм и размеров каналов с ламинарным течением теплоносителя.

Особенностью дисковой конструкции являлось то, что канал для обратного потока низкого давления представляет собой пористую структуру, изготовленную из плетёной металлической сетки (рис.19б). Конструкция микрорефрижератора защищена патентом № 1758364.

При проектировании таких конструкций планарных микрорефрижераторов требовалось знание теплогидравлических характеристик каналов с сетчатой пористой структурой. В таком канале происходит течение теплоносителя вдоль плоскости сетки. Полученные результаты исследования показали, что теплогидравлические характеристики щелевого канала, заполненного сеткой, существенно отличаются от таковых для гладкой щели и сетчатой матрицы.

Экспериментально исследованы 2 планарных микрорефрижератора с каналами зигзагообразной формы (рис. 21).

Оба микрорефрижератора испытывались на различных режимах. Микрорефрижератор трехслойной конструкции испытывали на азоте при давлении 18 МПа прямого потока на входе в центральный канал.

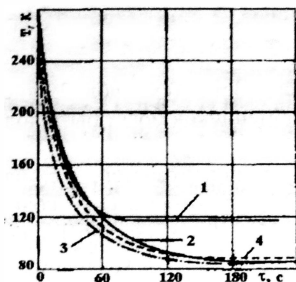


Рис. 21. Результаты испытаний планарных микрорефрижераторов. Понижение температуры в микрорефрижераторах при их запуске: кривая -1 трехслойная конструкция; кривые 2-4 — двухслойная конструкция

Давление азота не менялось во времени, т.к. азот подавался из сети. Микро-рефрижератор двухслойной конструкции испытывали как на азоте, так и на газовых смесях с высоким начальным давлением 17...22 МПа.

На графике (рис. 21) показано изменение температуры пластины в зоне, расположенной за дроссельным каналом, т.е. в зоне конструкции, имеющей минимальную температуру, которая достигала 83 К.

В пятой главе приведены предложенные показатели оценки эффективности теплообменных поверхностей применительно к рекуперативным и регенеративным теплообменникам и даны результаты их применения для оценки эффективности исследованных матричных и других альтернативных поверхностей теплообмена. В этой главе также представлены результаты технико-экономического исследования эффективности матричного теплообменника, показаны особенности расчёта высокоэффективных теплообменников для криогенных установок и приведена методика расчёта МТ.

При проектировании этих установок предпочтение отдается таким типам и конструкциям теплообменных аппаратов, которые позволяют получить минимальные габариты при прочих равных заданных условиях. Аппараты с малыми размерами имеют, как правило, и меньшую массу и массовую теплоемкость конструкции, что важно при пусковых и переходных режимах работы установок. Теплопритоки к таким аппаратам, также меньше. Для выявления поверхности, которая позволила бы получить теплообменник минимального объема, не обязательно проводить его полный тепловой и гидравлический расчет, а достаточно получить отношение объемов V_2/V_1 , занимаемых данной и сравниваемой поверхностью при одинаковых условиях, а именно при равных: тепловой нагрузке поверхностей Q , расходе теплоносителя через поверхности G , гидравлическом сопротивлении поверхностей ΔP и среднем температурном напоре Δt между потоком и поверхностями.

Отношение:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{S_1 D_{s2} A_1}{S_2 D_{s1} A_2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)^{n_2/\gamma_2} Re_1^{n_1 - \gamma_1(n_2/\gamma_2)} \quad (30)$$

позволяет проследить изменение отношения V_2/V_1 в зависимости от расхода теплоносителя, т.е. в зависимости от Re_1 .

Отношение фронтальных сечений сравниваемых поверхностей будет равно:

$$\frac{F_{\text{фр2}}}{F_{\text{фр1}}} = \frac{Re_1 S_1}{Re_2 S_2}.$$

Проведенное сравнение четырнадцати поверхностей (см. табл. 25 диссертации) показывает, что наименьшие объемы теплообменников могут быть получены при использовании матричных поверхностей.

Для оценки эффективности регенеративных поверхностей, т.е. насадок, применен относительный тепловой показатель Q/Q_6 , в котором Q — количество тепла, переданное сравниваемой поверхностью, а Q_6 — количество тепла, переданное базовой поверхностью, относительно которой ведется сравнение. Значения теплового показателя Q/Q_6 рассчитываются при условии, что расходы теплоносителя G через насадки, гидравлическое сопротивление ΔP и объемы V сравниваемой и базовой поверхностей равны (S -компактность).

С учетом изменения величины температурных напоров по времени τ формула для определения относительного теплового показателя запишется так:

$$\frac{Q}{Q_6} = \frac{S \cdot Nu_{\text{эб}}}{S_6 \cdot Nu_6 D_3} \exp \left\{ \lambda \cdot \tau \left[\frac{S_6 \cdot Nu_6}{c_{\text{уд}6} \rho_6 (1 - \varepsilon_6) D_{\text{эб}}} - \frac{S \cdot Nu}{c_{\text{уд}} \rho (1 - \varepsilon) D_3} \right] \right\} \quad (32)$$

Предложенный метод оценки эффективности регенеративных поверхностей теплообмена позволил обоснованно определять температурную границу смены насадок в регенераторах с комбинированной насадкой. Было установлено, что для комбинированной насадки регенератора ГХМ состоящей из мелкой бронзовой сетки и свинцовых шариков температурная граница смены насадок не всегда совпадает с температурой ($T=60\text{K}$), при которой равны удельные значения теплоёмкости свинца и бронзы и может меняться в широком диапазоне температур ($20 \dots 150 \text{ K}$) в зависимости от числа Re теплоносителя.

В разделе 5.3 представлены результаты исследований технико-экономической эффективности матричного теплообменника предназначенного для эксплуатации в составе бортовой самолётной системы. Оценка производилась по затратам за весь жизненный цикл аппарата, включая затраты на НИОКР, себестоимость теплообменника, стоимость провоза единицы массы теплообменника, стоимость оборудования для его изготовления и с учетом ресурса эксплуатации. Показано, что экономический эффект от замены трубчатого теплообменника на матричный имеет место уже при равенстве их ресурсов и растет с увеличением ресурса матричного теплообменника, который в несколько раз больше по сравнению с трубчатым аппаратом. Экономический эффект Э_τ от замены трубчатого ТА на матричный рассчитан в виде разности соответствующих суммарных затрат за ЖЦ для каждого ТА.

$$\text{Э}_\tau = \text{З}_{\text{тр.жц}} - \text{З}_{\text{м.жц}}, \quad (33)$$

где $\text{З}_{\text{тр.жц}}$ и $\text{З}_{\text{м.жц}}$ — затраты за ЖЦ для трубчатого и матричного теплообменников, соответственно.

В разделе 5.4 показана особенность расчёта высокоэффективных ТА для криогенных установок. Опыт создания и исследования высокоэффективных ТА ($\varepsilon_r \geq 0,95$) показывает, что действительная эффективность аппарата оказывается

меньше расчетной. Действительные выходные температуры теплоносителей отличаются от расчетных и, чтобы обеспечить требуемую проектную эффективность ТА, приходится увеличивать его поверхность теплообмена. Такая ситуация нередко возникает при проектировании ТА нижних ступеней охлаждения, где эффективность ТА достигает $\varepsilon_T = 0,98$.

В результате анализа процессов теплообмена в высокоэффективных противоточных ТА было установлено, что причиной снижения эффективности аппаратов является действие вторичных факторов теплообмена, возникающих в реальной конструкции ТА. Такими факторами являются:

- продольная теплопроводность по стенкам разделяющим теплоносители и элементам поверхности теплообмена, возникающая из-за разности температур между теплым и холодным концами ТА;
- теплоприток из окружающей среды к поверхности теплообмена ТА;
- расходная неравномерность одноименного теплоносителя между каналами и по сечению каждого канала, возникающая из-за неравномерности поля скоростей на входе в каналы, а также из-за отклонения размеров сечений каналов от номинальных.

Если предположить, что влияние этих факторов на теплообмен проявляется независимо друг от друга, то эффективность реального аппарата можно представить как:

$$\varepsilon = \varepsilon_T - \Delta\varepsilon_\lambda - \Delta\varepsilon_{o.c} - \Delta\varepsilon_p, \quad (34)$$

где $\Delta\varepsilon_\lambda$, $\Delta\varepsilon_{o.c}$, $\Delta\varepsilon_p$ - доля снижения эффективности ТА из-за влияния продольной теплопроводности, теплопритоков, расходной неравномерности, соответственно.

ε_T - теоретическая эффективность ТА не подверженного влиянию вторичных факторов;

В работе показано, что применяя результаты исследований П. Крёгера, Р. Баррона, И.Н. Журавлёвой и др. можно определить значения $\Delta\varepsilon_\lambda$, $\Delta\varepsilon_{o.c}$, $\Delta\varepsilon_p$.

В разделе 5.5 приведена методика оптимизационного расчёта матричного теплообменника. Методика предполагает два варианта расчета - проектный и поверочный. Методика проектного расчета позволяет оптимизировать ширину каналов МТ и количество пар каналов, что в конечном итоге приводит к оптимизации всех габаритных размеров матрицы (высоты и поперечного сечения). Целевой функцией оптимизации при выбранных геометрических параметрах ПП и прокладки является объем матрицы. Поверочный расчет производится при известных размерах поперечного сечения матрицы теплообменника.

Оба варианта расчета имеют место в практике проектирования новых конструкций теплообменных аппаратов матричного типа.

В шестой главе показаны технологические особенности, достижения и проблемы изготовления матричных и планарных теплообменников из различных металлов (медь, сталь, алюминиевые сплавы и титан). Перфорированные пластины, как с круглой, так и со щелевой формой перфорации можно получать методом

механической штамповки, что экономически оправдано при изготовлении большого числа пластин.

Для изготовления тонких медных перфорированных пластин практически с любыми размерами и формой перфорации можно использовать способ гальвано-пластики, который представляет собой комплекс фотохимических и гальванических процессов. Для получения ИП из алюминия и алюминиевых сплавов применяют способ электрохимического травления. Получение алюминиевых пластин травлением является сложным, но отработанным технологическим процессом. Другой элемент матрицы - прокладки (как неметаллические, так и металлические) изготавливают вырезкой по шаблону или более производительным способом - вырубкой с помощью штампа.

Тонкие металлические прокладки с малой шириной перемычек можно получить способом магнито-импульсной штамповки с использованием упругой промежуточной среды (резины) для передачи энергии деформации. При таком методе удается полностью исключить утяжку металла и образование заусенцев. Магнито-импульсной штамповкой, в частности, изготавливали прокладки из листа коррозионностойкой стали толщиной $\delta_n = 0,2 \dots 0,3$ мм при ширине внешних и внутренних перемычек между каналами $B = 2 \dots 2,5$ мм на предприятии НПО "НАУКА" (г. Москва).

В работе приводятся сведения по технологии склеивания элементов матрицы в единую герметичную конструкцию. Такие технологии разработаны в Одесской государственной академии холода, НПО "Гелиймаш" совместно с ЛТИ им. Ленсовета, в НПО "Криогенмаш". Однако клёные конструкции не обладали требуемой прочностью и надёжностью соединения.

При изготовлении матричных теплообменников только вакуумно-диффузионная сварка позволяет получать высокопрочные и герметичные конструкции матричных и планарных теплообменников. Положительные результаты получены при изготовлении таким способом матриц, состоящих из медных ИП и прокладок из стали 12Х18Н10Т. Отклонение размеров каналов от номинальных в таких конструкциях минимально. Первые сварные теплообменники матричного и планарного типа изготовлены В.А. Веселовым в НПО "Кислородмаш" (г.Одесса) по его технологии. Особый интерес представляют конструкции матричных теплообменников изготовленные из лёгких металлов (алюминий, титан), элементы которых соединены диффузионной сваркой.

Поисковые исследования по разработке алюминиево-титанового МТ проводились нами совместно с Волгоградским государственным техническим университетом (каф. "Сварочное производство") и НПО С.А. Лавочкина, где осуществлялась диффузионная сварка экспериментальных образцов МТ. По результатам исследований получен патент № 1760301 на конструкцию алюминиево-титанового матричного теплообменника и способ его изготовления. Прокладки для такого МТ изготавливались из тонколистового композиционного материала (ТЛКМ) толщиной ~ 0,9 мм. ТЛКМ представлял собой лист титана ВТ1-0 плакированный с обеих сторон алюминием А5 методом сварки взрывом с последующей прокаткой до требуемой толщины (0,6...1,0 мм). Толщина плакировки с каждой стороны ~ 0,3 мм.

В РГТУ им. К.Э. Циолковского—"МАТИ" (О.А. Барабанова) совместно с Одесской государственной академией холода (В.В. Притула) разработан новый способ изготовления матричных теплообменников, алюминиевые элементы которых прочно соединены между собой через тонкую прослойку стекла. Полученная таким образом матрица представляет собой слоистый композиционный материал (СКМ), состоящий из плоских алюминиевых ПП, прокладок и тонких слоёв связующего материала, который является многокомпонентной оксидной системой (МОС), синтезированной на основе оксидов свинца, бора, цинка, кремния меди и висмута.

Возможность применения предложенной технологии для изготовления матричных теплообменников из алюминия и его сплавов является основным достоинством этого метода. В то же время теплообменники изготовленные таким образом имеют ограничения по избыточному давлению теплоносителей, которое не должно превышать 2,5 МПа.

Технология диффузионной сварки в вакууме медно-стальных матричных ТА, исследованных в настоящей работе, допускает их работоспособность при давлениях теплоносителей выше на порядок, т.е. до 25 МПа и более.

Основные результаты и выводы

1. Разработаны, созданы и исследованы новые типы высокоэффективных теплообменных аппаратов матричного и планарного типов, предназначенные для применения в компактных и миниатюрных криогенных системах. Основу их конструкции составляет тонколистовая слоисто-пористая металлическая композиция (матрица) с компактностью, достигающей $10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и более. Изготовление таких теплообменников осуществляется с применением современных высоких технологий: диффузионной сварки, высокоточной штамповки тонких плоских элементов, электрохимического травления в сочетании с фотолитографией.

2. В результате выполненного комплекса экспериментальных работ:

- исследованы процессы теплообмена и течения газообразного теплоносителя в сетчатых матрицах, изготовленных из сеток отечественного производства (N 004....N 112) при разных способах их укладки в матрицу (плотная, разреженная). Впервые исследовано влияние турбулентных и расходных пульсаций теплоносителя на интенсивность конвективного теплообмена в матрице. Установлена количественная связь между стабилизацией теплообмена в плотноупакованной матрице и её относительной высотой;

- исследован процесс теплообмена и течения однофазного теплоносителя в матрицах из перфорированных пластин с круглой и щелевой перфорацией с диаметром отверстия (щели) 0,5...2,0 мм и имеющих компактность $6320...982 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Исследованы матрицы, имеющие три варианта взаимного расположения отверстий: со смещением, без смещения и комбинированные (последние исследованы впервые);

- исследован теплообмен и гидродинамическое сопротивление при кипении теплоносителя (воды) в канале с матричной поверхностью из перфорированных пластин при вынужденном течении теплоносителя и в условиях естественной конвекции. Впервые получено большое количество экспериментальных данных по интенсивности теплообмена при кипении в теснённых условиях зазора ($\delta \leq 1 \text{ мм}$).

между перфорированными пластинами в режимах недогрева ($\Delta T_{нг}=0...34\text{K}$), при температурных напорах $\Delta T_s=0...4\text{ K}$ и массовых паросодержаниях на входе до 10%; определён критический тепловой поток ($q_{кр}\approx 300\text{ кВт/м}^2$);

- результаты исследований теплогидравлических характеристик при конвективном теплообмене однофазного теплоносителя в сетчатых матрицах и в матрицах из перфорированных пластин с круглой и щелевой перфорацией систематизированы, обобщены и представлены в виде критериальных зависимостей удобных для практического применения; полученные результаты при кипении в канале с матричной поверхностью также обобщены и представлены в виде удобном для расчёта теплообменников-испарителей матричного типа с круглой перфорацией при различных значениях геометрических параметров матрицы ($d=1.6...2\text{мм.}$, $\delta p=0,71...1,03\text{мм.}$, $\delta=0,5...1,0\text{мм.}$, $p=0,732...0,919$) и различных режимах кипения.

3. Выполнены теоретические исследования эффективности плоского перфорированного одиночного ребра треугольной формы, а также ребра функционирующего в составе матрицы, когда температура потока омывающего ребро не является постоянной по сечению канала, результаты этих исследований подтверждены экспериментальными данными; выполнена оптимизация размеров основных геометрических параметров перфорированных пластин.

4. Изготовлены и испытаны матричные теплообменники в составе ряда действующих установок и образцов новой техники: при криогенных температурах (4,5 K) в составе гелиевого ожижителя ОГ-200 (НПО "Криогенмаш"); в системе охлаждения масла топливом турбореактивного авиационного двигателя (НПО "МОТОР", г. Уфа); в установке риформинга бензина в качестве подогревателя паров бензина (АО "Морские системы Сухого"). Проведённые испытания подтвердили работоспособность и высокую эффективность матричных теплообменников в полном соответствии с заданными условиями на их проектирование.

5. Впервые разработаны и испытаны экспериментальные образцы микрофрижераторов, изготовленных на базе металлических (сталь 12X18H10T) планарных микротеплообменников; выполнено численное и экспериментальное исследование особенностей теплообмена и течения газа в микроканалах сложной формы, применяемых в планарных теплообменниках. Установлено, что в этих каналах интенсивность теплообмена существенно меняется по длине, а средние коэффициенты теплоотдачи выше, чем в прямых каналах в два и более раз и зависят от геометрической формы и размеров сечения каналов.

6. Для оценки эффективности исследованных теплообменных поверхностей матричного типа разработаны методики, позволяющие по относительному (относительно базовой поверхности) объёмному (габаритному) или относительному тепловому показателю определить эффективность сравниваемых между собой теплообменных поверхностей. При этом целевой функцией (относительным показателем) учитываются тепловые, гидравлические и геометрические характеристики сравниваемых поверхностей.

7. С помощью относительного объёмного показателя проведено сравнение матричных поверхностей между собой, с пластинчато-ребристыми поверхностями и с трубчато-витыми. Показано, что матричные поверхности по эффективности не

уступают известным поверхностям теплообмена, а с понижением рабочей температуры их эффективность возрастает.

8. Техничко-экономическое исследование эффективности матричных теплообменников показало их преимущество по сравнению с традиционной штатной конструкцией трубчатых теплообменников, применяемых в системах охлаждения масла современных авиационных турбореактивных двигателей. Показателем технико-экономической эффективности теплообменников являлись затраты за весь жизненный цикл аппаратов. В результате был сделан вывод о том, что уже при одинаковом с трубчатыми теплообменниками ресурсе матричные теплообменники дают существенную экономию, которая увеличивается с ростом ресурса матричных теплообменников. При этом специальные испытания, проведённые в соответствии с требованиями к авиационной технике, показали неограниченный прочностной ресурс работы матричного теплообменника.

9. В результате комплекса проведённых исследований созданы научно-технические основы для проектирования нового поколения теплообменных аппаратов матричного и планарного типов, разработаны методы и методики расчёта матричных теплообменников, учитывающие технологию их изготовления с применением диффузионной сварки в вакууме. Особенности методики расчёта является то, что она позволяет минимизировать объём (массу) конструкции, а также учитывать влияние вторичных факторов (продольную теплопроводность и теплоприток извне) на эффективность теплообменника и, как следствие, на его конечные размеры.

10. В работе также рассмотрены вопросы, связанные с технологическими особенностями изготовления матричных и планарных теплообменников, а также технологические проблемы изготовления матричных теплообменников из лёгких металлов (алюминий, титан).

Основные публикации по теме диссертации

1. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Матричные теплообменные аппараты - М.: Машиностроение, 1983. - 110 с.
2. Криогенные системы; В 2 т. / А.М. Архаров, И.А. Архаров, Ю.А. Шевич и др.// Под ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина.- М.: Машиностроение.- 1999.- Т.2 - Основы проектирования аппаратов, установок и систем.- 720 с.
3. Теплотехника/А.М.Архаров, И.А.Архаров, Ю.А.Шевич и др.; Под ред. А.М. Архарова и В.Н. Афанасьева - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, - 711 с.
4. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Сравнение теплообменных поверхностей по относительным габаритным показателям// Известия ВУЗов.серия Машиностроение - 1977. -№9. - С. 48-54
5. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. К анализу геометрических параметров перфорированных пластин матричных теплообменников//Труды МВТУ.- 1979.- №296 Глубокий холод и кондиционирование.- С. 18-23

6. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Исследование эффективности перфорированных пластин матричных теплообменников// Химическое и нефтяное машиностроение.- 1979.- №5.- С. 13-15
7. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. К оценке эффективности регенеративных поверхностей теплообмена.// Труды МВТУ.- 1982.-№381 Глубокий холод и кондиционирование.-С. 55-63
8. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. К расчету высокоэффективных аппаратов криогенных установок.// Труды МВТУ.- 1986.- №460 Глубокий холод и кондиционирование.- С. 72-83
9. Дроссельные микрорефрижераторы с теплообменниками планарного типа/ Т.К. Даниленко, И.М. Давыдова. В.А. Веселов, Ю.А. Шевич// Химическое и нефтяное машиностроение.- 1989.- №10.- С. 17-19
10. Шевич Ю.А., Бакалейский С.Н., Чижиков Ю.В. Технико-экономическое исследование эффективности матричного теплообменника// Труды МГТУ.- 1991.- №554 Глубокий холод и кондиционирование.- С. 14-21
11. Исследование характеристик теплообменных поверхностей планарных микрорефрижераторов/ Т.К. Даниленко, Н.А. Соловов, С.Е. Климашенко, Ю.А. Шевич// Труды МГТУ. Глубокий холод и кондиционирование.- 1991.- №554.- С. 143-158
12. Влияние низких температур на теплообмен в матричных теплообменных аппаратах/Е.И. Микулин, Ю.А. Шевич, Н.А. Пуртов и др.// Сб. научн. трудов ОАО "Криогенмаш".- Балашиха, 1992.- С. 31-38
13. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысый О.А. Исследование теплообмена при кипении на матричных поверхностях из перфорированных пластин//Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1992.-№10-12.- С. 67-70
14. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысый О.А. Влияние недогрева на интенсивность теплообмена при кипении на матричных поверхностях // Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1993.-№3-5.- С. 62-65
15. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысый О.А. Экспериментальное исследование теплообмена при конвективном кипении в канале с матричной поверхностью// Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1993.-№10-12.- С. 61-63
16. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Лысый О.А. Исследование теплообмена при кипении на матричных поверхностях из перфорированных пластин // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1993. - Спец. выпуск.- С. 34-40
17. Шевич Ю.А., . . . Новые разработки и исследования матричных теплообменных аппаратов// Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1995. - Спец. выпуск.- С. 61-66
18. Шевич Ю.А., Шакурова О.Н. Исследование теплообмена при кипении в каналах теплообменника-испарителя// Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1996. - Спец. выпуск.- С. 58-62
19. Shevich Y.A., Veselov V.A. New Development and Research of Matrix Heat Exchangers // The Fifth Cryogenics'98 IIR International conference.- Praha, (Czech Republic), 1998.-P. 64-67

20. Шевич Ю.А., Михайлов А.В., Югов В.П. Расчет теплообмена и гидродинамического сопротивления в микроканалах планарных теплообменников// Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1998. - Спец. выпуск.- С. 97-108
21. Металлические слоисто-пористые композиционные материалы для создания высокоэффективных теплообменных аппаратов/ Ю.А. Шевич, В.А. Веселов, А.Н. Кравенцов, С.Н. Бобров//Слоистые композиционные материалы-98: Сб. докл. Междунаrodn. конф.- Волгоград, 1998.-С. 204-206
22. Михайлов А.В., Шевич Ю.А. Расчетное исследование теплообмена и течения газа в микроканалах планарных теплообменников// Труды II Российской национальной конференции по теплообмену. -М.- 1998.- Т8. С. 32-33
23. Даниленко Т.К., Могорычный В.И., Шевич Ю.А. Экспериментальное исследование микрорефрижераторов планарного типа// Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2000. - Спец. выпуск.- С. 119-123
24. Mikulin E.I., Lysyi O.A. Boiling Heat Transfer and Hydrodynamics in Matrix-type Channels// Experimental Thermal and Fluid Science.-2001.- № 25.-Р. 65-72
25. Патент № 615348 (РФ) Насадка регенератора/ Ю.А. Шевич, Е.И. Микулин // БИ.-1978. - Бюл. № 26.
26. Патент № 1758364.(РФ) Дроссельный микрорефрижератор / Ю.А. Шевич, Е.И. Микулин., Т.К. Даниленко//Откр.изобрет. 1992. - Бюл. № 72.
27. Патент № 1760301 (РФ) Пакет матричного теплообменника и способ его изготовления/ Ю.А. Шевич, Е.И. Микулин., Г.И. Глуховский и др.//Откр.изобрет.- 1992. - Бюл. № 33.
28. Патент № 2000022 (РФ) Микрорефрижератор/ Ю.А. Шевич, С.Л. Александров, В.Н. Трифонов и др.//Откр.изобрет.- 1993. - Бюл. № 6.
29. Патент № 2106588 (РФ) Матричный теплообменник/ Ю.А. Шевич, Г.И. Глуховский, В.А. Веселов// БИ.- 1998. - Бюл. № 7.

Подписано к печати 11.02.08. Заказ № 75
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
263-62-01