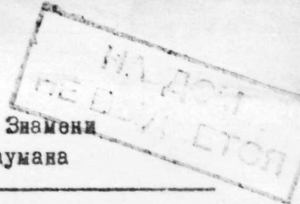


М 358438

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана



На правах рукописи

ПОТАПОВ Владимир Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ
ИЗ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТИН

(Специальность 05.04.03. - Гидравлические машины, машины
и аппараты холодильной и криогенной техники)

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

Москва - 1980

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор МИКУЛИН Е.И.
- Научный консультант - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник ШЕВИЧ Ю.А.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор МАНУШИН Э.А.
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник ЖУРАВЛЕВА И.Н.
- Ведущее предприятие - НПО "Криогенмаш"

Защита диссертации состоится " " _____ 1980 г.

в _____ час. _____ мин.

на заседании Специализированного Совета К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, вакуумные и компрессорные машины и аппараты" МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, Лефортовская набережная, 15, строение".

С диссертацией и копией автореферата можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Автореферат диссертации высылать по почте не рекомендуется.

Ваше предложение о присвоении диссертации степени кандидата технических наук, просьба направить в МВТУ имени Н.Э.Баумана.

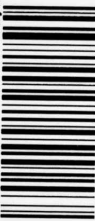
Выслать _____ л., д.5.

специ
канд

М 3,58438

ОЗЛОГ

НТБ МВТУ им. Н.Э. Баумана



1358438

Потапов В.Н. Исследование

Актуальность темы. Создание высокоэффективной компактной теплообменной аппаратуры является одним из условий успешного развития ряда отраслей народного хозяйства и в частности техники низких температур и кондиционирования.

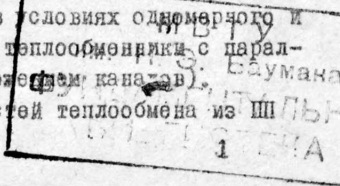
В решении Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (1977г.), посвященной 60-ти летию Октября, отмечались как наиболее важные и перспективные, следующие направления научных и инженерно-технических работ: "В области криогенной и холодильной техники - исследования в направлении интенсификации процессов теплообмена в криогенных аппаратах (пористые поверхности и покрытия, оребрение) и создание промышленных высокоэффективных компактных теплообменников новых типов для криогенных установок и систем кондиционирования...".

Совершенствование теплообменной аппаратуры идет по пути увеличения интенсивности процесса передачи тепла, снижения гидравлических сопротивлений и повышения компактности аппаратов. Этим условиям удовлетворяют конструкции матричных теплообменников из перфорированных пластин, для расчета и проектирования которых необходимо иметь надежные зависимости по определению в них интенсивности теплообмена и гидравлического сопротивления.

Цель работы. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления, с целью получения надежных зависимостей, необходимых для проектирования высокоэффективных компактных матричных теплообменников из перфорированных пластин (ПП).

Задачи настоящей работы определяются следующим образом:

- Экспериментальное исследование интенсивности теплообмена и гидравлического сопротивления в матричных теплообменниках из ПП с различным типом и размером перфораций.
- Экспериментальное исследование влияния величины зазора между ПП и взаимного расположения смежных ПП на интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление в матрице.
- Обобщение полученных результатов по исследованию теплообмена и сопротивления в матричных теплообменниках зависимостями, удобными для практического применения.
- Теоретическое и экспериментальное исследование эффективности тонких перфорированных ребер, работающих в условиях одномерного и двумерного температурного поля (матричные теплообменники с параллельным, шахматным и concentричным расположением канатов).
- Оценка эффективности матричных поверхностей теплообмена из ПП.



и сопоставление их с другими известными компактными поверхностями теплообмена витого и пластинчато-ребристого типа.

- Исследование влияния основных геометрических параметров ПП на эффективность матрицы.

- Проведение тепловых и гидравлических испытаний моделей клеевых матричных теплообменников и сравнение полученных данных с расчетными зависимостями.

Методы исследования. При решении дифференциальных уравнений, описывающих процесс теплопередачи в тонких перфорированных ребрах, использовались методы математической физики. Обработка данных экспериментальных исследований, с целью их обобщения, проведена на основе теории подобия. Экспериментальная часть работы выполнена с применением современной измерительной аппаратуры.

Научная новизна. В результате теоретического решения получены и подтверждены экспериментально расчетные зависимости для определения эффективности тонких перфорированных ребер различной конфигурации, имеющих место в матричных теплообменниках с параллельным, шахматным и концентричным расположением каналов. Проведены экспериментальные исследования матричных теплообменников из перфорированных пластин с различной формой и геометрическими параметрами перфорации, в результате которых установлено влияние величины зазора между пластинами, взаимного расположения ПП и формы перфорации на тепловые и гидравлические характеристики. Получены обобщающие зависимости, позволяющие определить интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление в матричных теплообменниках из ПП.

Практическая ценность. Получены надежные зависимости, необходимые для расчета и проектирования матричных теплообменников из ПП с различной формой и размерами перфорации, а также различной формы и взаимного расположения каналов. На основании полученных рекомендаций созданы и экспериментально исследованы модели клеевых матричных теплообменников из перфорированных пластин.

Внедрение. Полученные на основании проведенных исследований расчетные зависимости и рекомендации используются в промышленности при проектировании и создании компактных матричных теплообменников для систем кондиционирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной конференции по холоду "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (Ташкент, 1977г.), на II Всесоюзной научно-техничес-

кой конференции по холодильному машиностроению (Мелитополь, 1978г.) и на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980г.). Содержание диссертации обсуждалось на заседаниях научно-технического семинара и заседаниях кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, получено 1 авторское свидетельство и одно положительное решение Госкомизобретений по заявке № 2760314/24-06 (064711) от 24.10.1979г. Основные разделы диссертации изложены также в 3-х научно-исследовательских отчетах.

Объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав и выводов, содержит 125 страниц машинописного текста, 5 таблиц, 48 рисунков. Список литературы включает в себя 68 наименований работ.

В первой главе проводится обзор литературных и патентных источников информации по конструкциям, технологии изготовления и результатам экспериментального исследования матричных теплообменников из перфорированных пластин.

Особенностью конструкции таких аппаратов является то, что они состоят из набора чередующихся между собой металлических ПП и дистанционных прокладок. Перфорированные пластины изготавливаются из материала с высокой теплопроводностью - меди, алюминия или алюминиевых сплавов. Дистанционные прокладки, определяющие форму и размеры сечения каналов теплообменника, выполняются из неметаллических материалов, или из металла с высокой теплопроводностью, например, нержавеющей стали. Герметичность конструкции таких теплообменников достигается за счет склеивания, сварки, пайки или сжатия друг с другом ПП и дистанционных прокладок. Разработанные способы технологии производства матричных теплообменников позволяют получать вакуумноплотные соединения пластин и прокладок, работоспособные при температурах от 10К до 523К и давлениях теплоносителей в каналах до нескольких десятков и даже сотен атмосфер.

Благодаря применению тонких ПП и малых зазоров между ними, компактность таких аппаратов достигает $6000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и более, а использование дистанционных прокладок из неметаллического материала практически исключает продольную теплопроводность по высоте теплообменника.

Показано, что несмотря на те преимущества, которыми обладают матричные теплообменники из перфорированных пластин, их по-

следованием начали заниматься сравнительно недавно. Имеющиеся на сегодняшний день отдельные экспериментальные данные, полученные в работах *Mc. Mahona, Fleminga*, Анашкина О.А., Патрикеева В.Н. и др., Орлова В.К. и Шевяковой С.А., Журавлевой И.Н., Заблочки Н.С. и других, не систематизированы, что затрудняет их обобщение с целью получения надежных расчетных зависимостей по определению теплообменных и гидравлических характеристик. В известных немногочисленных работах не отражено влияние геометрических параметров ПП и их взаимного расположения в матрице на теплообменные и гидравлические характеристики аппарата. В работах Орлова В.К. и Шевяковой С.А. отмечен характер влияния зазоров между ПП на характеристики матриц, однако этот факт также не систематизирован. Так же отсутствуют какие-либо рекомендации по расчету эффективности тонких перфорированных ребер, имеющих место в матричных теплообменниках с каналами квадратного и круглого сечения, соответственно при их шахматном и концентричном расположении.

В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию теплообмена и сопротивления в матричных теплообменниках из перфорированных пластин, изучению влияния основных геометрических параметров теплообменной поверхности на интенсивность теплообмена и сопротивления в ней с целью получения надежных зависимостей для расчета таких аппаратов.

Глава II содержит результаты теоретического и экспериментального исследования эффективности тонких перфорированных ребер, работающих в условиях одномерного и двумерного температурного поля. В зависимости от формы каналов и расположения их по сечению теплообменника, перфорированная пластина, рассматриваемая в качестве ребра, может работать как в условиях одномерного температурного поля, например, при параллельном расположении каналов, так и в условиях двумерного температурного поля, например, при шахматном или концентричном расположении каналов. В связи с этим при расчете теплообменников возникает необходимость определения эффективности η таких перфорированных ребер. Решая задачу об определении η тонкой одиночной ПП, работающей в условиях одномерного температурного поля, В.А.Кирпиков и И.И.Лефман предложили учитывать влияние перфорации путем введения в формулу параметра ребра коэффициентов, учитывающих изменение поверхности теплообмена ребра и его эффективной теплопроводности из-за наличия перфорации, не подтвердив это тепловым экспериментом.

Для экспериментальной проверки способа учета влияния перфорации на эффективность тонкой одиночной ПП, работающей в условиях

одномерного температурного поля был изготовлен экспериментальный стенд. Перфорированная пластина помещалась в теплоизолированный воздуховод таким образом, что через ее перфорированную часть продувался сухой очищенный воздух при температуре $t_a = 60 \pm 80^\circ\text{C}$. Тепло от пластины отводилось в одном направлении путем погружения ее сплошной удлиненной части в сосуд Дьюара с тающим льдом. Распределение температуры по длине ребра определялось с помощью одноэлектродных медно-константановых термопар. Температура набегающего на ПП потока воздуха, поддерживалась постоянной по сечению канала. Исследования температурных полей перфорированных пластин проводились при различных расходах воздуха.

Показано, что у исследованных пластин в диапазоне изменения их пористости p — от 0,18 до 0,51 и толщины пластины от 0,27 мм до 1,5 мм наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений эффективности ребра (см. рис. 1), что подтверждает приемлемость предложенного способа учета влияния перфорации на эффективность ребра.

При определении η_r ПП, работающей в условиях двумерного температурного поля, на примере теплообменника с шахматным расположением каналов квадратного сечения, было сделано и подтверждено экспериментально, предположение о том, что изотермы температурного поля перфорированной пластины в пределах канала располагаются в виде квадратов со сторонами, параллельными стенкам канала. Тогда, в силу симметрии температурного поля ПП, достаточно знать закон распределения температуры по высоте элемента ребра треугольного профиля, в рамках которого температурное поле пластины можно рассматривать одномерным. Это обстоятельство значительно упростило задачу аналитического исследования эффективности перфорированного ребра.

Экспериментальное исследование температурного поля одиночной ПП, работающей в условиях двумерного температурного поля, проводилось на модели, у которой тепловой поток отводился в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Характер температурного поля перфорированной пластины был исследован с помощью термоиндикаторов-жидких кристаллов, меняющих свою цветовую гамму в зависимости от изменения температуры пластины. Показано, что изотермические участки поверхности ПП — участки, окрашенные в одинаковый цвет, располагаются в виде прямых углов со сторонами, параллельными стенкам канала, независимо от соотношения геометрических параметров исследуемых перфорированных пластин.

Для определения эффективности тонкого треугольного перфори-

ребра, составлено дифференциальное уравнение теплопроводности ребра при условии постоянной температуры потока воздуха, омывающего ребро, t_b и температуры основания ребра t_0 :

$$x^2 \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{dt}{dx} + m^2 x (t_b - t) = 0 \quad (1)$$

где: $m^2 = 2\alpha\Phi/\lambda\delta B$ - параметр ребра, t и x - температура и координата сечения ребра.

Уравнение (1) приводится к стандартной форме уравнения Бесселя, решив которое, была получена зависимость, характеризующая закон распределения температуры по тонкому треугольному ребру с углом при вершине ребра $\varphi = 90^\circ$ и основанием ребра длиной L :

$$\frac{t}{t_0} = \frac{I_0(mx)}{I_0(m\frac{L}{2})} + \frac{t_b}{t_0} \left[1 - \frac{I_0(mx)}{I_0(m\frac{L}{2})} \right], \quad (2)$$

и зависимость для определения эффективности тонкого треугольного перфорированного ребра

$$\eta_p = \frac{2}{m\frac{L}{2}} \cdot \frac{I_1(m\frac{L}{2})}{I_0(m\frac{L}{2})} \quad (3)$$

где: $I_0(m\frac{L}{2})$ и $I_1(m\frac{L}{2})$ - модифицированные функции Бесселя.

На рис.1 показано удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений η_p пластины, работающей в условиях двумерного температурного поля, что подтверждает приемлемость полученных зависимостей.

Для перфорированного ребра, расположенного в канале круглого сечения и работающего также в условиях двумерного температурного поля, получена зависимость, характеризующая закон распределения температуры по радиусу ребра

$$\frac{t}{t_0} = \frac{I_0(mR)}{I_0(mR)} + \frac{t_b}{t_0} \left[1 - \frac{I_0(mR)}{I_0(mR)} \right] \quad (4)$$

и зависимость для определения эффективности такого ребра

$$\eta_p = \frac{2}{mR} \cdot \frac{I_1(mR)}{I_0(mR)} \quad (5)$$

где: R - радиус круглого ребра.

Результаты приведенных выше исследований справедливы для одноточной пластины, работающей при условии постоянной по сечению канала температуры набегающего на нее потока воздуха. В подобных условиях находятся III, расположенные на входе потока в матрицу. Для перфорированных пластин, расположенных в матрице, это условие не распространяется, что справедливо отмечено в работе

Flemingа, который предложил, что разность температур между потоком воздуха t_a и ребром t становится неизменной по длине ребра. Исходя из этого предположения им получена зависимость для расчета η_p стержня постоянного сечения: $\eta_p = (1 + m^2 l^2 / 3)^{-1}$. Однако экспериментальная проверка этой зависимости для перфорированных ребер отсутствует.

В настоящей работе такое исследование выполнено. Для этого использовалась тепловая модель, состоящая из набора чередующихся медных ПП и фторопластовых прокладок. Количество пластин в матрице было переменным. По аналогии с одиночной пластиной, через матрицу продувался воздух при $t_a = 60 \div 80^\circ\text{C}$, а тепло от пластины отводилось в сосуд Дьюара со льдом. При этом измерялось температурное поле предпоследней (контрольной) ПП и набегающего на нее потока воздуха. Показано, что уже при количестве пластин в матрице равном $N = 6 \div 7$, наблюдается тенденция к неизменности температурного напора по длине ребра (см. рис. 2). Экспериментальное подтверждение неизменности температурного напора между потоком и ПП, расположенной в матрице позволило получить теоретическое решение задачи по определению температурного поля перфорированной пластины и эффективности перфорированного ребра для теплообменников с шахматным расположением каналов при условии постоянной разности температур между потоком и ребром по сечению канала. При этом в качестве исходного принято дифференциальное уравнение (1), в котором $(t_a - t) = \text{const}$:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt}{dx} = -m^2 x (t_a - t) = -a \quad (6)$$

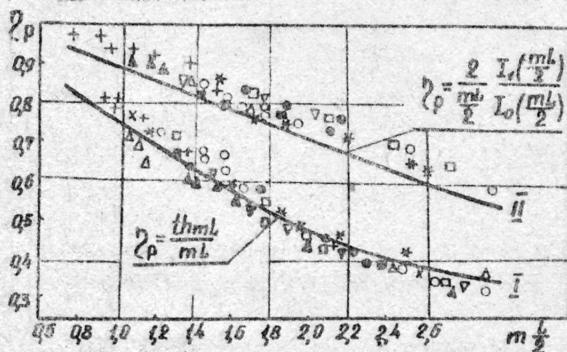


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные значения эффективности перфорированных ребер для случая одномерного (I) и двумерного (II) температурных полей.

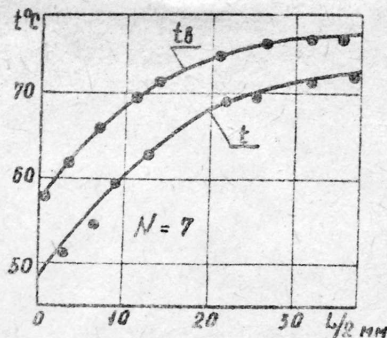
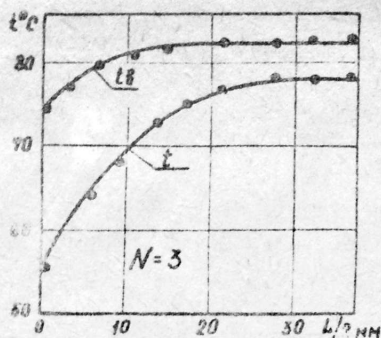


Рис.2. Влияние количества пластин в матрице на характер температурного поля контрольной ПП- t и набегающего на нее потока воздуха - t_a .

В результате решения этого уравнения получена зависимость для определения температурного поля ПП и зависимость для определения эффективности перфорированного ребра.

В матрице с шахматным расположением каналов квадратного сечения:

$$t = \frac{m^2}{4} (t_a - t) \left(\frac{L^2}{4} - x^2 \right) + t_0; \quad (7)$$

$$\eta_p = \left[1 + \frac{m^2 (L/2)^2}{6} \right]^{-1} \quad (8)$$

и в матрице с концентричным расположением каналов для ПП, расположенной в канале круглого сечения:

$$t = \frac{m^2}{4} (t_a - t) (R^2 - x^2) + t_0 \quad (9)$$

$$\eta_p = \left(1 + \frac{m^2 R^2}{6} \right)^{-1} \quad (10)$$

В работе показано удовлетворительное совпадение полученных экспериментальных и расчетных данных по эффективности перфорированных ребер, работающих в условиях двумерного температурного поля для случая постоянной разности температур между ребром и потоком по сечению канала.

В главе III приводится описание конструкций экспериментальных моделей матричных теплообменников, экспериментальной установки и методики исследования.

Исследования теплообмена и гидравлического сопротивления проводились на разборных моделях двух типов. Одни модели, имеющие

3 каналов, расположенных в шахматном порядке по сечению матрицы, собирались из пластин с квадратной и круглой перфорацией. Другие модели, имеющие 3 параллельно расположенных канала, собирались из пластин с щелевой перфорацией. Для создания экспериментальных моделей матричных теплообменников были выбраны медные и алюминиевые ПП 6 типоразмеров (см. табл. 1).

Таблица 1

№	Тип перфорации	$a \cdot 10^3$ мм	$t \cdot 10^3$ мм	$b \cdot 10^3$ мм	ρ	S м ² /м ³	$d \cdot 10^3$ мм	Материал
1	квадратная	0,6	1	0,155	0,351	10800	0,6	медь
2	круглая	0,9	1,5	0,29	0,283	6204	0,9	АД1
3	круглая	1,35	2,25	0,29	0,27	5785	1,35	АД1
4	щелевая	0,5	1	0,174	0,477	7947	0,484	медь
5	щелевая	1	2	0,28	0,5	4638	0,882	АД1
6	щелевая	2	4	0,28	0,5	4138	1,58	АД1

Медные пластины изготавливались методом гальванопластики, а алюминиевые — методом электрохимического травления.

Модель теплообменника состояла из матрицы, коллекторов и текстолитовых проставок. Матрица теплообменника представляла из себя набор ПП, чередующихся с фторопластовыми прокладками, выполненными по форме и размерам в соответствии с пластинами с шахматным или параллельным расположением каналов. Наличие фторопластовых прокладок обеспечивало необходимый зазор между пластинами и герметичность матрицы при сборке модели с помощью стяжных шпилек. Для обеспечения равномерного распределения потоков по каналам матрицы, после коллекторов поставлены специальные выравнивающие пластины. Между коллекторами и матрицей располагались текстолитовые проставки, в которых помещались трубки для замера давлений потоков на входе и выходе из матрицы и термомпары для замера средних, по сечению канала, температур прямого и обратного потоков на входе и выходе из матрицы.

Испытания моделей матричных теплообменников проводились при умеренных плюсовых температурах и давлениях потоков до 0,25 МПа. В качестве теплоносителя использовался сухой очищенный воздух, проходящий противотоком через модель. Количество перфорированных пластин в матрице достигало 40 штук. Специальные экспериментальные исследования показали, что стабилизация теплообмена в матри-

цах поступала при количестве ПП, равном 10+20 штук.

Из перфорированных пластин каждого типоразмера собиралось от 6 до 8 матриц с различным зазором между пластинами, который менялся от 0,11 до 0,9 мм. Всего таким образом было испытано 67 моделей матричных теплообменников.

Конструкция экспериментального стенда для проведения испытаний и подбор измерительной аппаратуры позволяли в достаточно широких пределах регулировать параметры потока теплоносителя, его расход и геометрические параметры матрицы.

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в определении коэффициентов теплоотдачи и сопротивления. Расходы давления и температуры потоков для каждого режима определялись при наступлении тепловой стабилизации процессов. Экспериментальные данные представлены в критериальном виде зависимостями $Nu_0 = f(Re_0)$ и $\xi_0 = \varphi(Re_0)$. В качестве характерного геометрического размера в критериях Nu_0 и Re_0 принимался эквивалентный диаметр отверстия перфорации d_0 , который для ПП с квадратной и круглой перфорацией численно совпадал с диаметром отверстия перфорации, а для ПП с щелевой перфорацией был равен половине гидравлического диаметра щели. В качестве определяющей скорости в критерии Re_0 и коэффициенте сопротивления ξ_0 принималась массовая скорость в отверстиях перфорации.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментального исследования. Показано, что на теплообменные и гидравлические характеристики, наряду с такими геометрическими параметрами матрицы как величина зазора между пластинами — δ_{np} и пористость пластины — P , значительное влияние оказывает взаимное расположение ПП в матрице. В соответствии с этим исследования проводились на экспериментальных моделях, отличающихся тремя вариантами взаимной ориентации смежных перфорированных пластин:

Матрицы "со смещением" собирались из одинаковых ПП, уложенных таким образом, что отверстия перфорации у смежных пластин не совпадали друг с другом. Матрицы "без смещения" собирались также из одинаковых ПП, но уложенных таким образом, что отверстия перфорации у смежных пластин совпадают друг с другом. Матрицы "комбинированные" собирались из ПП, имеющих одинаковую форму перфорации, но отличающихся между собой размером отверстий и шагом перфорации, что обеспечивало частичное перекрытие отверстий.

Со смещением была испытана 41 модель матричных теплообменников, собранных из пластин 6 типоразмеров с квадратной, круглой и щеле-

вой формой перфорации. Анализ экспериментальных данных по теплообмену показал, что величина зазора между ПП фактически не влияет на интенсивность теплообмена в матрице независимо от типа перфорации. Результатом обобщения данных по теплообмену для матриц, выполненных со смещением из пластин с квадратной и круглой перфорацией явилась зависимость

$$Nu_0 = 0,2 Re_0^{0,64} \quad (11)$$

справедливая при $70 < Re_0 < 2100$ и относительном зазоре $0,11 < \frac{\delta_{np}}{d} < 1,1$.

Показано удовлетворительное совпадение данных, полученных другими авторами (О.А.Анашкин, В.Е.Кейлин, В.М.Патрикеев - ИАЭ им.Курчатова; Н.С.Заблоцкий, В.А.Веселов и др. - ОТИХП; В.К.Орлов, С.А.Шевякова, Г.Н.Валеев - НПО Криогенмаш) с обобщающей зависимостью (11). Результатом обобщения экспериментальных данных по теплообмену в матрицах со смещением из пластин с щелевой перфорацией явилась зависимость

$$Nu_0 = 0,22 Re_0^{0,69} \quad (12)$$

справедливая при $30 < Re_0 < 1600$ и $0,075 < \frac{\delta_{np}}{d} < 1,1$.

Показано, что коэффициент сопротивления ξ_0 у матриц, выполненных со смещением, уменьшается с увеличением зазора между пластинами и в пределе стремится к сопротивлению одиночной ПП. Характеристики по сопротивлению у испытанных моделей соответствовали, в подавляющем большинстве случаев, автомоделному режиму течения. Полученные экспериментальные данные для моделей из пластин с квадратной и круглой перфорацией обобщены зависимостью

$$\xi_0 = \xi_1 [1 + 0,08 (\frac{\delta_{np}}{d})^{-0,8}] \quad (13)$$

справедливой при $Re_0 > 80,0$ и $0,110 < \delta_{np}/d < 1,1$; а данные для моделей с щелевой перфорацией, зависимостью

$$\xi_0 = \xi_1 [1 + 0,18 (\frac{\delta_{np}}{d})^{-1,58}] \quad (14)$$

справедливой при $Re_0 > 30,0$ и $0,075 < \delta_{np}/d < 1,1$;

где: $\xi_1 = (0,707 \sqrt{1 - \bar{f}} + 1 - \bar{f})$ - коэффициент сопротивления одиночной ПП ($\bar{f}$ - доля свободного сечения ПП).

По данным проведенных исследований рекомендованы в качестве оптимальных следующие величины относительных зазоров:

для пластин с круглой и квадратной перфорацией $\delta_{np}/d \approx 0,3$;

для пластин с щелевой перфорацией $\delta_{np}/d \approx 0,5$.

Без смещения было исследовано 26 моделей из пластин 4-х типоразмеров с круглой и щелевой перфорацией. Показано, что в отличие от моделей со смещением, при этом варианте компоновки матрицы, с увеличением зазора интенсивность теплообмена возрастает с одновременным увеличением гидравлического сопротивления. Характеристики по сопротивлению и в этом случае так же соответствовали автомодельному режиму течения. Экспериментальные данные по теплообмену, полученные для матриц без смещения из пластин с круглой перфорацией обобщены зависимостью

$$Nu_0 = 0,065 Re_0^{0,74} \left(\frac{\delta_{np}}{d} \right)^{0,21}, \quad (15)$$

а по сопротивлению зависимостью

$$\xi_0 = 0,78 \left(\frac{\delta_{np}}{d} \right)^{0,5} \quad (16)$$

которые справедливы при $200 < Re_0 < 1000$ и $0,11 < \delta_{np}/d < 1,1$. Экспериментальные данные по теплообмену, полученные для матриц без смещения из пластин с щелевой перфорацией, обобщены зависимостью

$$Nu_0 = 0,045 Re_0^{0,87} \left(\frac{\delta_{np}}{a} \right)^{0,5}, \quad (17)$$

а по сопротивлению зависимостью

$$\xi_0 = 0,44 \left(\frac{\delta_{np}}{a} \right)^{0,72} \quad (18)$$

которые справедливы при $200 < Re_0 < 1400$ и $0,075 < \delta_{np}/a < 0,88$.

Показано, что у матриц, собранных со смещением, независимо от типа перфорации, интенсивность теплообмена и сопротивление выше, чем у матриц, собранных без смещения.

Исследования комбинированных матриц, собранных из пластин с щелевой и круглой перфорацией показали, что обладая высокой интенсивностью теплообмена, присущей матрицам со смещением, они обладают существенно меньшим сопротивлением. Экспериментальные данные по теплообмену для комбинированных матриц из пластин с круглой перфорацией могут рассчитываться по зависимости

$$Nu_{ок} = 0,95 Nu_0, \quad (19)$$

справедливой при $250 < Re_0 < 1700$ и $0,2 < \delta_{np}/d < 0,5$, а коэффициент сопротивления, при значениях величины относительного зазора, $\delta_{np}/d = 0,3$, может быть принят $\xi_{ок} = 1,7$.

Интенсивность теплообмена комбинированных матриц из пластин с

целевой перфорацией может быть определена по зависимости

$$Nu_{ок} = 0,86 Nu_0 \quad (20)$$

справедливой при $150 < Re_0 < 900$ и $0,2 < \delta_{пр}/\varnothing < 0,5$, а коэффициент сопротивления $\xi_{ок}$ при значениях $\delta_{пр}/\varnothing = 0,5$, может быть принят: $\xi_0 = 1,1$.

В этой главе также приведена оценка погрешностей измерений и точности обобщений. Показано, что используемая при экспериментальных исследованиях контрольно-измерительная аппаратура позволяла получать данные с минимально-допустимыми значениями отклонений от ожидаемых номинальных величин.

В пятой главе проведена оценка эффективности испытанных матричных поверхностей теплообмена из перфорированных пластин при различных способах компоновки матрицы и сопоставление их другими известными эффективными поверхностями пластинчато-ребристого и трубчато-витого типа. Оценка проводилась по относительному объемному показателю. Показано, что матрицы, выполненные из ПП, уложенных со смещением, при прочих равных условиях эффективнее, чем матрицы без смещения. Комбинированные матрицы эффективнее матриц со смещением.

По результатам сопоставления показано, что матричные теплообменники из ПП не уступают, а во многих случаях и превосходят по эффективности лучшие образцы витых и пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена.

В этой главе проведена оценка влияния основных геометрических параметров ПП на эффективность матрицы. Для такой оценки предложен относительный тепловой показатель, который является отношением тепловой нагрузки, передаваемой сравниваемой поверхностью теплообмена Q_c к базовой $Q_б$ при равных значениях их объемов V , сопротивлений ΔP и расходов теплоносителя через них G . Более эффективной является та поверхность, которая имеет большее значение отношения $Q_c/Q_б$. Рассмотрены два варианта работы теплообменной поверхности: эффективность ребра у сравниваемых поверхностей $\eta_p = 1$; эффективность ребра у сравниваемых поверхностей $\eta_p < 1$. Для случая $\eta_p = 1$ показано, что наибольшей эффективностью обладают теплообменные поверхности, выполненные из тонких ПП ($\delta_{пр} = 0,2 \div 0,4$ мм), причем их эффективность практически не зависит от пористости пластины при изменении ее от 0,2 до 0,7. Для случая $\eta_p < 1$ показано, что различное сочетание основных геометрических параметров ПП в итоге может привести к их одинаковой

эффективности. Толщину пластины и длину ребра следует принимать такими, чтобы сохранить высокую компактность матричной поверхности при высоких η перфорированной пластины и приемлемых технологических требованиях.

В пятой главе описана конструкция клеевых моделей матричных теплообменников, выполненных из алюминиевых ПП с щелевой перфорацией при ширине щели $\sigma = 1$ мм. Приведены результаты испытаний клеевых моделей. Показано, что по теплообмену и гидравлическому сопротивлению характеристики клеевых моделей удовлетворительно согласуются с результатами исследований, полученных на экспериментальных разборных моделях теплообменников.

В ы в о д ы

1. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена и гидродинамики в матричных теплообменниках из металлических ПП с круглой (квадратной) и щелевой формой отверстий перфорации шести типоразмеров.
2. В результате экспериментального исследования на моделях теплообменников выявлено влияние зазоров между ПП, пористости ПП и формы отверстия перфорации на интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление матриц.
3. Установлено, для матриц обоих типов перфорации, большое влияние взаимного расположения смежных ПП в матрице (упаковка со смещением и без смещения) на их теплообменные и гидравлические характеристики.
4. Результаты экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики в матрицах с круглой (квадратной) и щелевой перфорацией, выполненных со смещением и без смещения, обобщены критерийными зависимостями удобными для расчета.
5. В результате анализа процессов теплообмена и гидродинамики в матрицах, выполненных со смещением и без смещения, предложены и экспериментально исследованы матрицы комбинированного типа с круглой и щелевой перфорацией.
6. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование температурных полей односторонних ПП и ПП, расположенных в матрице для случая одномерного и двумерного температурного поля пластин. В результате получены новые зависимости, позволяющие рассчитывать температурное поле и эффективность ребра ПП с двумерным температурным полем, имеющим место в матрицах с каналами квадратного и круглого сечения, а также подтверждена применимость зависимости

для расчета перфорированных ребер с однофазным температурным полем.

7. С помощью методики оценки эффективности теплообменных поверхностей по относительному тепловому и объемному показателю выполнен анализ влияния основных геометрических параметров ПП на эффективность матриц и проведено сопоставление эффективности исследованных матричных поверхностей с другими известными эффективными поверхностями пластинчато-ребристого типа и трубчато-винтовыми поверхностями теплообмена. Показано, что матричные поверхности теплообмена из ПП не уступают, а в ряде случаев и превосходят по эффективности известные компактные поверхности.

8. Экспериментально исследованы клееные теплообменники, выполненные из алюминиевых ПП с целевой перфорацией. Получено удовлетворительное совпадение теплообменных и гидравлических характеристик клееных моделей с характеристиками, рассчитанными по зависимостям, полученным в настоящем исследовании.

Список публикаций:

Основные результаты работы изложены в тезисах докладов на 3-х Всесоюзных конференциях:

1. "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха", Ташкент, 1977г.
2. "Научно-техническая конференция по холодильному машиностроению", Мелитополь, 1978.
3. "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении", Москва, 1980.

и пяти научных статьях:

1. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Применение матричных теплообменников в криогенной технике и их исследование. - Сб. трудов МВТУ "Глубокий холод и кондиционирование", № 239, 1976.
2. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Теплообмен и сопротивление в матричных теплообменниках. - Химическое и нефтяное машиностроение, № 3, 1979, М.; ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. с. 21-22.
3. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Исследование эффективности перфорированных пластин матричных теплообменников

им. Н. С. Баумана

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Химическое и нефтяное машиностроение , № 5, 1979. с.13-15.

4. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н. Результаты исследования матричных теплообменников. - Сб.трудов МВТУ "Криогенная техника и кондиционирование", № 318, 1980. с. 66-78.
5. Егорова Л.В., Солицев М.Я., Шевич Ю.А., Юсова Г.М., Давыдова И.М., Потапов В.Н. Опыт изготовления моделей матричных теплообменников. - Сб.трудов МВТУ "Криогенная техника и кондиционирование", № 240, 1976. с.107-110.

По результатам работы получено также авторское свидетельство и положительное решение по заявке:

1. Горшков А.М., Масляков В.А., Микулин Е.И., Никонов А.А., Потапов В.Н., Пучинин А.В., Шевич Ю.А. Пластинчатый теплообменник. - Авторское свидетельство СССР № 615350, заявлено 16.09.76., заявка № 2404331.
2. Микулин Е.И., Шевич Ю.А., Потапов В.Н., Десятов А.Т., Архаров А.М., Солицев М.Я., Юсова Г.М., Егорова Л.В., Пруслин В.Э., Иконникова Г.В., Давыдова И.М. Матричный теплообменник. - положительное решение по заявке № 2760314/24-06 от 24.10.1979.

Л-65374

Подписано к печати 27.02.80 г. , тираж 100 экз., объем 1 п.л.,
заказ № 259 . Типография МВТУ им.Н.Э.Баумана.