

Авторефер
П77

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ПРИТУЛА Валерий Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЕТЧАТЫХ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОБМЕННЫХ
АППАРАТОВ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса 1981

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

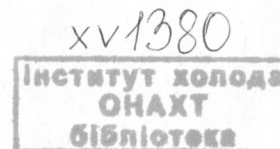
На правах рукописи

ПРИТУЛА Валерий Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЕТЧАТЫХ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ
АППАРАТОВ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

(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



Одесса - 1981

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки
УССР, доктор технических
наук, профессор Алексеев В. П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Кедлин В. Е.
- доктор технических наук,
доцент Смирнов Г. Ф.

Ведущее предприятие - научно-производственное
объединение "Микрокриоген-
ная техника", г. Омск.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1981 г.
в _____ час. _____ мин. на заседании специализирован-
ного Совета К 068.27.01 при Одесском технологическом институте
холодильной промышленности по адресу: 270000, Одесса, ГСП, ул.
Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1981 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
к. т. н., доцент

Р. К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Необходимым условием успешного решения комплекса специфических задач криогенной техники, улучшения технических и экономических показателей систем охлаждения является создание высокоэффективных теплообменных аппаратов и совершенствование технологии их изготовления. В связи с этим весьма перспективна разработка матричных рекуператоров, в частности металлополимерных сетчатых, для которых характерна высокая компактность поверхности теплообмена. Конструкция и способ изготовления этих аппаратов позволяют сравнительно просто осуществить различные компоновки каналов.

Для проектирования и промышленного внедрения сетчатых металлополимерных теплообменников необходимо располагать наравне с разработанным технологическим регламентом их изготовления надежными данными по исследованию интегральных характеристик интенсивности теплового и гидродинамического процессов в каналах. Также должны быть изучены теплофизические свойства композиционных материалов стенок теплообменника. Учитывая сказанное, проведение таких исследований является актуальной и своевременной задачей.

Цель работы является: экспериментальное исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах сетчатых теплообменников; экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование теплофизических свойств анизотропных материалов стенок сетчатого теплообменника; разработка технологического режима изготовления низкотемпературных сетчатых теплообменников на основе полимерных связующих композиций.

Наиболее существенные научные результаты работы:

1. Для каналов сетчатых теплообменников установлены области характерных режимов течения, например переход к автомодельному течению происходит при $Re = 2000 \pm 4000$. Показано, что для изученных типоразмеров сеток коэффициент их живого сечения может быть исполь-

зован в качестве параметра при обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплообмена и сопротивлению в сетчатых теплообменниках.

2. Получено, что с увеличением расстояния между сетками в каналах теплообменника до значений, не превышающих диаметра ячеек сетки, происходит относительное уменьшение гидравлического сопротивления канала на 15 + 17%.

3. Разработана модель композиционного материала, армированного сетками, и получены аналитические зависимости для расчета главных коэффициентов эффективной теплопроводности стенок сетчатых теплообменных аппаратов.

4. Получены корреляционные соотношения для расчета удельной теплоемкости и коэффициентов эффективной теплопроводности материала стенок сетчатых теплообменников в температурном диапазоне их эксплуатации.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Применение проволочных сеток в качестве теплообменных элементов матричных рекуператоров обеспечивает наиболее высокую теплогидродинамическую эффективность теплообменного аппарата.

2. Использование в сетчатых теплообменных аппаратах высокотеплопроводных сеток в сочетании с полимерными экранами существенно уменьшает коэффициент эффективной теплопроводности стенок вдоль теплообменника, что приводит к уменьшению необратимых потерь энергии вследствие недорекуперации.

Научная новизна. Впервые в широком диапазоне расходных параметров и типоразмеров проволочных сеток проведены экспериментальные исследования и получены обобщающие зависимости, позволяющие определить интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление каналов сетчатых теплообменников, установлено влияние на характеристики теплообмена и сопротивления пакетов сеток расстояния между ними. На основании теоретического анализа и полученных экс-

периментальных данных впервые предложены зависимости для расчета коэффициентов эффективной теплопроводности анизотропных материалов стенок сетчатых теплообменников. Определены температурные и концентрационные зависимости теплоемкости и коэффициентов температурного линейного расширения материалов стенок теплообменников.

Практическая ценность. В результате исследования теплообмена и гидравлического сопротивления пакетов сеток, изучения теплофизических свойств композиционных материалов стенок теплообменников получены надежные зависимости, необходимые для конструкторских расчетов сетчатых теплообменных аппаратов. Накоплен большой объем справочной информации по теплофизическим свойствам анизотропных металлополимерных материалов, армированных сетками.

Разработан и защищен авторскими свидетельствами СССР способ изготовления матричных металлополимерных теплообменных аппаратов на основе термореактивных связующих. Изобретения исследованы и рекомендованы для промышленного использования.

Реализация работы. Полученные на основании проведенных исследований расчетные соотношения и рекомендации используются при разработке теплообменных аппаратов в НПО "Микрокриогенная техника", НПО "Кислородмаш" и СКТБ КХМ ПО "Одесхолодмаш".

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзном научно-техническом совещании "Создание и применение трубчатой и пластинчатой теплообменной аппаратуры (г.Таллин, 1974г.), на II Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии (ВНИХИ, г.Москва, 1975г.), на XIV международном конгрессе по холоду (г.Москва, 1975г.), на Всесоюзной конференции по холоду "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха (г.Ташкент, 1977г.), на Всесоюзном совещании "Математическое моделирование и системный анализ теплообменного оборудования" (г.Киев, 1978г.), на VI Всесо-

вской конференции по теплообмену (г. Минск, 1980г.), на V республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств" (г. Днепропетровск, 1980г.), на Всесоюзном семинаре "Научно-технические проблемы криогенной техники и кондиционирования" (МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1980г.) и на научно-технических конференциях ОТИХП в 1974+ 81 гг.

Результаты работы по созданию и исследованию сетчатых металлополимерных низкотемпературных рекуператоров отмечены бронзовой медалью ВДНХ СССР, дипломами III и I степени ВДНХ УССР. В 1981 г. проведены междудомственные испытания многоканального сетчатого металлополимерного теплообменника.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, получено три авторских свидетельства и одно положительное решение по заявке № 2807062/24-06 от 27.02.80. Отдельные результаты диссертационной работы изложены в четырех научно-исследовательских отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (163 наименования работ) и приложений, содержит 130 страниц машинописного текста, 64 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проводится анализ конструкций сетчатых теплообменников и обзор литературных источников информации, относящихся к исследованию теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах таких аппаратов, изучению теплофизических свойств композиционных материалов их стенок и особенностей технологического процесса изготовления металлополимерных низкотемпературных теплообменников.

В отличие от традиционных методов изготовления теплообменного оборудования производство сетчатых металлополимерных теплообменников заключается в склеивании большого числа чередующихся между

собой проставок (экранов) и проволочных сеток из высокотеплопроводного материала. Конфигурация экранов определяет форму, размеры и число каналов теплообменного аппарата, экраны служат также основой для нанесения полимерной связующей композиции.

Анализ работ по теплообмену и сопротивлению каналов сетчатых теплообменников показал, что эти исследования выполнены различными методами и носят характер частных обобщений. Обширные экспериментальные исследования теплообмена и течения в пакетах сеток связаны с изучением сетчатых насадок регенераторов. Основным научно-прикладным результатом этих работ следует считать получение аппроксимационных зависимостей для расчета теплогидравлических характеристик плотноуложенных пакетов мелкоячеистых сеток в ограниченном диапазоне скоростей газовых потоков.

При обзоре работ по теплопереносу в гетерогенных средах установлено, что в настоящее время отсутствуют необходимые для расчета сетчатых рекуператоров данные по теплофизическим свойствам армированных сетками металлополимерных материалов. В то же время существует возможность аналитического определения эффективных коэффициентов теплопроводности и установления связи свойств композита с его структурой, которая заложена в анализе гетерогенных систем методами теории обобщенной проводимости.

Из опубликованных сообщений, относящихся к разработке технологии изготовления сетчатых металлополимерных теплообменников, следует, что эта задача также не решена.

На основании проведенного анализа в работе были поставлены следующие задачи: исследование теплообмена и гидравлического сопротивления пакетов проволочных сеток в каналах сетчатых теплообменников с различными геометрическими параметрами теплообменной поверхности; разработка на основании теории обобщенной проводимости модели анизотропного композиционного материала стенок металлополимерных сетчатых теплообменников и вывод формул для расчета

главных коэффициентов эффективной теплопроводности, экспериментальная проверка полученных зависимостей; экспериментальное исследование удельной теплоемкости и температурных коэффициентов линейного расширения композитов в температурном диапазоне эксплуатации теплообменника; разработка технологического процесса изготовления многоканальных сетчатых металлополимерных теплообменников.

Во второй главе проводится описание методики и экспериментального стенда для исследования теплообмена и гидравлического сопротивления каналов сетчатых теплообменников, установок для изучения теплофизических свойств материалов стенок таких теплообменных аппаратов и экспериментальной установки для изготовления многоканальных сетчатых металлополимерных теплообменников.

Для изготовления сетчатых теплообменников и моделей их каналов были использованы проволоочные сетки №007I+09 из латуни Л-80 (ГОСТ 6613-73) с различными расстояниями между ними.

Экспериментальное изучение теплообмена пакетов сеток проведено нестационарным методом, основанным на теоретическом решении задачи прогрева неподвижного пористого слоя. Реализация этого метода основана на сравнении получаемого экспериментально темпа прогрева пакета сеток с теоретическим значением этого параметра, определяемым совместным решением уравнений:

$$\frac{I_0(2i\sqrt{YZ})}{I_1(2i\sqrt{YZ})} = \frac{1+Z}{\sqrt{YZ}}; \quad (1)$$

$$N_q \tau = \chi Y \sqrt{\frac{Y}{Z}} e^{-Y-Z} I_1(2i\sqrt{YZ}); \quad (2)$$

$$\frac{\theta_q}{\theta_0} = e^{-Y-Z} \sum_{n=0}^{\infty} Z M_n(YZ), \quad (3)$$

где $M_n(YZ) = \frac{d^n I_0(2i\sqrt{YZ})}{d(YZ)^n}$; $I_0(2i\sqrt{YZ})$, $I_1(2i\sqrt{YZ})$ - функции Бесселя первого рода; θ_q, θ_0 - относительные температуры газового потока; N_q, τ - темп и время прогрева пакета сеток; Y, Z, χ - параметры, учитывающие геометрическую структуру и теплоаккумулирующую способность пакета сеток.

Экспериментальные данные по теплообмену и гидравлическому сопротивлению пакетов сеток представлены в виде зависимостей $Nu(Re)$ и $Eu(Re)$, в качестве характерных скорости и линейного размера приняты скорость в ячейках сетки и их эквивалентный диаметр.

Коэффициенты теплопроводности композитов определены на установках, в основу работы которых положен метод измерения термического сопротивления образца в процессе его монотонного нагрева (ГОСТ 23630.2-79). При экспериментальном определении температурно-концентрационных зависимостей удельной теплоемкости использован метод теплового анализа, основанный на измерении теплового потока, полученного образцом в ходе его линейного разогрева. Температурные коэффициенты расширения композитов были измерены на линейном dilatометре, плотность определена методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 15139-69).

Расчет максимальных относительных погрешностей параметров, регистрируемых в ходе опытов, показал, что погрешность экспериментального определения чисел Eu и Nu не превышает 10 и 14% соответственно. Погрешность определения теплофизических свойств композиционных материалов составляет 6+10%.

Изготовление сетчатых металлополимерных теплообменников проводилось на специально спроектированной экспериментальной установке. Равномерный прогрев прессуемого теплообменника обеспечивался подачей подогретого воздуха через распределительный коллектор в каналы пакета.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию и ана-

лизу полученных результатов по теплообмену и сопротивлению каналов сетчатых теплообменников. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием геометрических параметров структуры плетения сеток, определяемых расчетом: пористости сетки p и канала p_r , коэффициента живого сечения f . Оценивая величину зазора δ между сетками с помощью параметра $p_r = (\delta + 2d)/2d$, получено соотношение для вычисления компактности сетчатого рекуператора с "шахматным" расположением квадратных каналов со стороны α :

$$p_r = \frac{1}{p_r p_r} \left[S'_{ya} + \frac{4(p_r - 1)}{\alpha} \right], \quad (4)$$

где $S'_{ya} = \frac{4(1-p)}{d} + \frac{8-\pi/m}{2\alpha}$; $p_r = 1 - \frac{1-p}{p_r}$; $m = t/d$.

Первоначально изучено влияние на сопротивление и теплообмен в каналах теплообменника типа сеток в случае их идеального расположения ($p_r = 1$). Показано, что коэффициент сопротивления, являясь монотонно убывающей функцией числа Рейнольдса, при $Re = 2000 + 4000$ более не зависит от скорости, т.е. режим течения в пакетах сеток соответствует автомодельному. Обработка экспериментальных данных с учетом параметра f позволила установить расхождение зависимостей $Eu(Re)$ для двух групп сеток: № 0071+02 и № 0355+09. Для каждой из этих групп сеток значение коэффициента живого сечения практически постоянно и составляет соответственно 0,34+0,39 и 0,48+0,51. В результате были получены следующие зависимости: для каналов с сетками № 0071+02

$$Eu = \frac{17}{Re} + \frac{0,38}{Re^{0,12}}, \quad (5)$$

для каналов с сетками № 0355+09

$$Eu = \frac{25,8}{Re} + \frac{0,5}{Re^{0,13}}, \quad (6)$$

справедливые до значений числа Рейнольдса 2200 и 8000 соответственно и обобщающие данные опытов на моделях каналов с числом се-

ток от 60 до 400 штук.

Испытаниями моделей, количество сеток в которых изменялось от $N = 4$ до $N = 60$ (сетка № 045), определено, что начиная с $N = 20$, как и для мелких сеток, изменение сопротивления становится пропорциональным числу сеток в канале (рис.1).

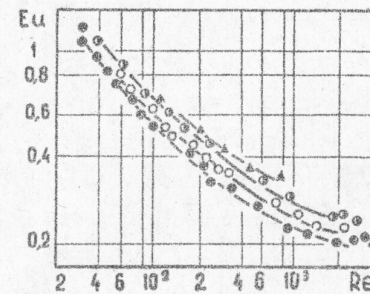


Рис.1. Влияние числа сеток в канале на гидравлическое сопротивление (№ 045):
 ● - N = 20; 60; 100;
 ○ - N = 14; ● - N = 8;
 ▲ - N = 5

Показано, что для исследованных типов сеток также существует связь между коэффициентами средней теплоотдачи при различных скоростях потока и геометрическими характеристиками каналов. Результатом обобщения экспериментальных данных по теплообмену для каналов с сетками № 0071+014 и № 0355+07 явились зависимости:

$$Nu = 0,98 Re^{0,49} \quad (7)$$

$$Nu = 0,065 Re^{0,8} \quad (8)$$

Было экспериментально установлено, что с увеличением расстояния между сетками в каналах до $\delta = (0,6 + 1) \Delta$ происходит некоторое уменьшение коэффициента сопротивления, которое не превышает 15+17% (рис.2). С дальнейшим увеличением зазора сопротивление восстанавливается до значений, соответствующих $p_r = 1$, и далее постепенно растет, приближаясь к сопротивлению одиночной сетки. Подобного уменьшения сопротивления не зафиксировано в каналах многоканальных сетчатых теплообменников, что связано с влиянием техно-

логических факторов, которые не позволяют достаточно точно создать незначительный зазор между сетками. По этой причине для расчета гидравлического сопротивления каналов сетчатых теплообменников при изменении расстояния между сетками в них до значений, сравнимых с диаметром ячеек сетки, следует пользоваться зависимостями (1) и (2). Когда $\delta > (1 + 1,2) \Delta$, изменение сопротивления следует рассчитывать из соотношения

$$Eu_{\delta} = Eu (1 + 0,043 p_L). \quad (9)$$

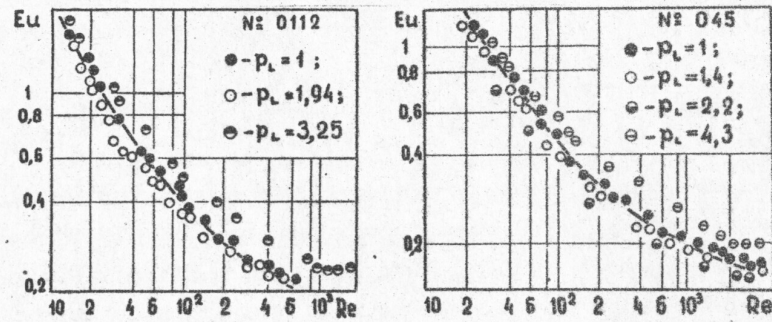


Рис. 2. Влияние расстояния между сетками в канале на гидравлическое сопротивление ($N = 200$)

Влияние расстояния между сетками на характеристики средней теплоотдачи пакетов сеток было исследовано при испытаниях моделей каналов теплообменника с сетками № 0071 + 02 и 045. Для прикладных расчетов полученные результаты представлены в форме соотношения

$$Nu_{\delta} = p_L^n Nu. \quad (10)$$

В диапазоне изменения параметра p_L от 1 до 3 найдены следующие значения показателя n : $n = 0,1$ для сеток № 0071; 02 и $n = 0,3$ для пакетов из сетки № 045.

Данные экспериментальных исследований теплообмена и сопротивления каналов, вырезанных из блоков сетчатых теплообменников с

числом каналов более шестнадцати, позволяют считать, что деформации каналов и сеток в процессе изготовления теплообменника, попадание связующего в каналы аппарата и неравномерность расположения сеток по высоте канала приводят к изменению характеристик гидравлического сопротивления и теплообмена до 20% по отношению к значениям, определяемым соотношениями (5) + (10).

В четвертой главе приведены результаты экспериментального изучения удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температурных коэффициентов линейного расширения композиционных материалов стенок металлополимерных сетчатых теплообменников в зависимости от температуры при различных объемных концентрациях компонентов. Разработана модель структуры композита и получены зависимости для расчета его коэффициентов эффективной теплопроводности.

Коэффициенты эффективной теплопроводности композита как вдоль армирующих сеток $\lambda_{||}$, так и перпендикулярно плоскости армирования λ_{\perp} определены в диапазоне относительной объемной концентрации сеток $m_{||} = 0,03 \div 0,3$. При температуре 293 К с изменением концентрации $m_{||}$ значения этих коэффициентов теплопроводности составляют соответственно $0,8 \div 3,8$ Вт/(м·К) и $0,35 \div 0,72$ Вт/(м·К) (рис. 3, 4). Кривые $\lambda_{\perp}(T)$ и $\lambda_{||}(T)$ с увеличением температуры от 113 К до 293 К носят возрастающий характер, близкий к линейному, что позволяет их аппроксимировать зависимостью вида $\lambda_i = \lambda_0(1 - b_i T)$, где λ_0 - коэффициент эффективной теплопроводности при 293 К, b_i - постоянный коэффициент.

Совпадение числовых значений коэффициентов теплопроводности для композитов с различными сетками при одинаковых значениях объемных концентраций $m_{||}$ указывает на отсутствие влияния типа армирующей сетки на коэффициенты теплопроводности λ_{\perp} и $\lambda_{||}$.

Были измерены коэффициенты теплопроводности образцов композита в процессе их термоциклирования от 293 до 77 К. Результаты опытов показали, что кратность термоциклирования не влияет на величину

ну коэффициента теплопроводности изучаемых материалов.

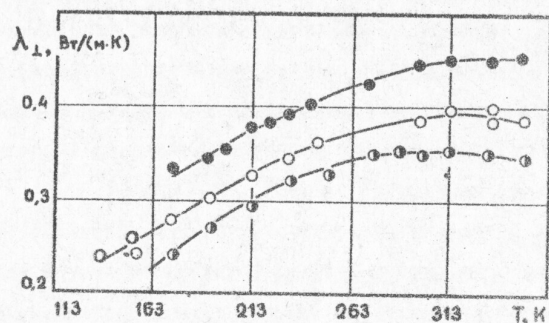


Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности композиционного материала (№ 0071; 009; 016; 045; 07):
 ○ — $m_{11} = 0,04$;
 □ — $m_{11} = 0,07$;
 ● — $m_{11} = 0,12$

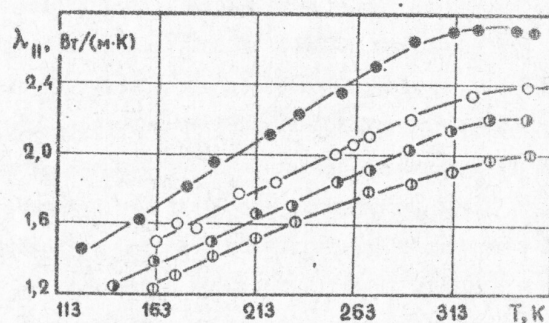


Рис. 4. Температурные зависимости теплопроводности композиционного материала (№ 0071; 016; 02; 045; 056; 09):
 ○ — $m_{11} = 0,1$;
 □ — $m_{11} = 0,13$;
 △ — $m_{11} = 0,16$;
 ● — $m_{11} = 0,18$

Анализ полученных экспериментально температурно-концентрационных зависимостей теплоемкости показал, что удельная теплоемкость армированных сетками композитов с относительным объемным содержанием связующего $0,75 + 0,098$ при температуре 293 К составляет $0,6 + 1,25$ кДж/(кг·К). С понижением температуры до 113 К удельная теплоемкость уменьшается почти в два раза (рис. 5). Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными подтвердило возможность определения удельной теплоемкости композитов по правилу смеси.

Для аморфных полимеров, к которым относятся эпоксидные смолы, свойственно наличие перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное при температуре стеклования T_g , выше которой утра-

чивается деформационная устойчивость композиционных материалов на основе эпоксидных связующих. Область этого перехода проявляется в нарушении монотонного хода температурных зависимостей $\lambda(T)$ и $c_p(T)$ при температуре $323 + 363$ К (рис. 3-5). Следовательно, температурный диапазон эксплуатации сетчатых теплообменников, изготавливаемых с применением эпоксидных связующих, следует ограничивать температурой 323 К.

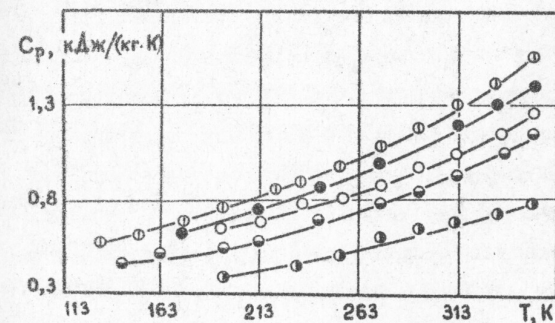


Рис. 5. Температурные зависимости уд. теплоемкости композиционного материала:
 ○ — $m_{11} = 0,02$;
 ● — $m_{11} = 0,04$;
 □ — $m_{11} = 0,07$;
 △ — $m_{11} = 0,12$;
 ● — $m_{11} = 0,25$

Результаты измерений коэффициентов линейного расширения армированных сетками композитов показали, что при концентрациях m_{11} , характерных для материалов стенок сетчатых теплообменников, тепловое расширение в направлении армирования определяется коэффициентом линейного расширения проволок сетки, в ортогональном направлении преобладающим становится влияние полимерного связующего.

В настоящей главе методами теории обобщенной проводимости гетерогенных систем определены зависимости для расчета коэффициентов эффективной теплопроводности исследуемых композиционных материалов.

Упорядоченное расположение сеток в стенках теплообменника и характер переплетения проволок в сетках позволяет выделить для анализа элементарную ячейку, которая изображена на рис. 6.

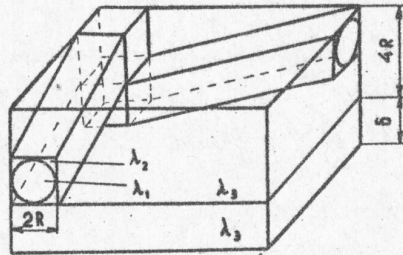


Рис. 6. Модель ячейки композиционного материала стенок сетчатого теплообменника

Здесь предполагалось, что проволоки имеют форму цилиндров, вписанных в прямоугольные параллелепипеды связующего, остальное пространство элементарной ячейки заполнено материалом экранов с эффективным коэффициентом теплопроводности λ_3 . Для вычисления коэффициентов теплопроводности композиционного материала рассмотрен перенос тепла в элементарной ячейке при разбиении ее на отдельные участки системой адиабатно-изотермических плоскостей. В соответствии с полученными схемами соединения термических сопротивлений были найдены соотношения для расчета коэффициентов эффективной теплопроводности:

$$\lambda_{II} = (1 - m_{33}) \left[\frac{m_1 \lambda_y (\lambda'_1 + \lambda'_y)}{2m_1 \lambda_y + m_2 (\lambda'_1 + \lambda'_{II})} + \frac{m_2 \lambda_z \lambda_x}{m_2 \lambda_x + m_1 \lambda_y} + \frac{m_{33}}{1 - m_{33}} \lambda_3 \right]; \quad (II)$$

$$\lambda_I = \frac{1}{(1 - m_{33})^2} \left[\frac{m_1^2 \lambda'_1 \lambda_3}{\lambda_3 (1 - m_{33}) + \lambda'_1 m_{33}} + \frac{2m_1 m_2 \lambda_3 \lambda_z}{\lambda_3 (1 - m_{33}) + \lambda_2 m_{33}} + m_2^2 \lambda_3 \right]. \quad (I2)$$

Здесь

$$\lambda'_1 = \lambda_1 \lambda_2 \int_0^R \frac{dx}{\lambda_1 R + (\lambda_2 - \lambda_1) \sqrt{R^2 - x^2}}, \quad (I3)$$

для случая $\lambda_1 > 0,5 \lambda_2$

$$\bar{\lambda}'_1 = \frac{\bar{\lambda}_1}{1 - \bar{\lambda}_1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\bar{\lambda}_1}{\sqrt{2\bar{\lambda}_1 - 1}} - \arctg \sqrt{2\bar{\lambda}_1 - 1} \right); \quad (I4)$$

$$\bar{\lambda}'_{II} = 1 + 0,785 (\bar{\lambda}_1 - 1); \quad (I5)$$

$m_1 = m_{11} \frac{d}{t(1-p)}$; $m_2 = m_{22} \frac{t-d}{tp}$; $\bar{\lambda}'_{1,II} = \lambda'_{1,II} / \lambda_2$; $\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 / \lambda_2$; λ_3 - коэффициент теплопроводности связующего; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - коэффициенты эффективной теплопроводности участков модели. Аналитические и графические зависимости для вычисления указанных коэффициентов теплопроводности приведены в работе.

Сравнение результатов расчета по формулам (II) и (I2) с опытными данными в широком диапазоне типоразмеров сеток и концентраций связующего подтвердило правильность исходных предпосылок.

В пятой главе представлены результаты по разработке технологии изготовления низкотемпературных сетчатых металлополимерных теплообменных аппаратов. Разработка технологического процесса происходила с использованием в качестве экранов волокнистых материалов, способных к формованию при прессовании теплообменника.

На этапе предварительных исследований на основе феноло- и трикрезолоформальдегидных смол марок 26э; 254э; 239; 244; ЛБС-9; СБС были изготовлены блоки сетчатых теплообменников с двумя и девятью каналами. Отдельные положительные результаты получены при изготовлении теплообменников на основе лаков СБС, ЛБС-9 и трикрезольных смол. Нарушение герметичности стенок в этих случаях наблюдалось после 20+40 термоциклов при разности давлений в каналах 0,8+1,2 МПа.

Значительный объем исследований проведен с применением полимерных композиций на основе полифункциональных эпоксидных смол. В качестве отвердителя применен ароматический диамин горячего отверждения Диамет - X, технологическим преимуществом которого является возможность создания композиций с длительной жизнеспособностью при сравнительно коротком времени отверждения. Было изготовлено 36 образцов двух- и девятиканальных теплообменников при оптимальных параметрах режимов переработки связующих. Испытания показали, что стенки большинства образцов работоспособны при перепаде давлений в каналах более 2,5 МПа. После термоциклирования в диапазоне тем-

ператур 77+ 373 К только в теплообменниках на основе низковязкой диановой смолы ЭД-24 не обнаружено нарушения герметичности стенок до 3 МПа.

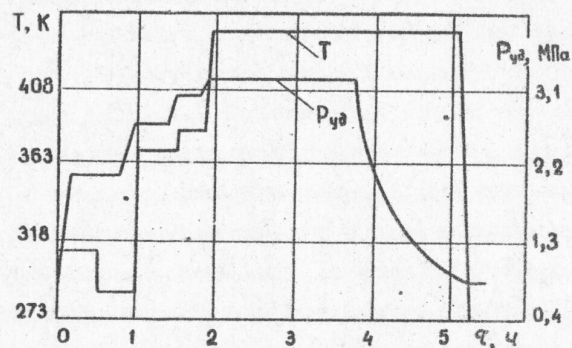


Рис. 7. Изменение режимных параметров процесса прессования сетчатого теплообменника (Диамет-Х/ЭД-24)

На основании полученных результатов разработан технологический регламент изготовления из сеток № 0071+ 07 49-канальных металлополимерных теплообменников с "шахматным" расположением квадратных каналов (14x14мм) и толщиной стенок 3мм. Изготовлено более 60 таких аппаратов, содержащих от 100 до 300 сеток.

Связующую композицию приготавливали при стехиометрическом соотношении Диамет -Х и смолы ЭД-24. Растворением в ацетоне плотность композиции доводили до 1050 кг/м³. После пропитки и предварительной полимеризации связующего изготавливали штамповкой экраны теплообменника, которые вместе с сетками собирались в пакет в специальном приспособлении. Прессование теплообменника (рис. 7), состоящее в контролируемом расплавлении связующего, происходило при прогреве пакета проходящим по его каналам воздухом, температура которого изменялась в процессе ступенчато до 433 К.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов гидродинамики и теплопереноса в металлополимерных сетчатых теплообменных аппаратах, применяемых в криогенных установках.

2. Для двенадцати типоразмеров тканых проволочных сеток на основании экспериментальных данных получены в широком диапазоне скоростей газового потока критериальные зависимости по теплообмену и сопротивлению каналов сетчатых теплообменников.

3. Определено влияние расстояния между сетками на интенсивность теплообмена и гидравлического сопротивления. Показано, что различные технологические факторы, связанные с процессом изготовления многоканальных металлополимерных теплообменников, приводят к изменению их тепловых и гидравлических характеристик до 20%.

4. Получены экспериментально и обобщены температурно-концентрационные зависимости коэффициентов эффективной теплопроводности, удельной теплоемкости, температурных коэффициентов линейного расширения и плотности анизотропных композиционных материалов стенок сетчатых теплообменников. Определены соотношения для расчета коэффициентов эффективной теплопроводности армированных сетками композиционных материалов и подтверждено удовлетворительное соответствие результатов расчета с опытными данными.

5. Разработана технология производства сетчатых многоканальных низкотемпературных теплообменных аппаратов, проведены их лабораторно-заводские и межведомственные испытания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Заблоцкая Н.С., Притула В.В. Разработка технологии изготовления низкотемпературных компактных матричных теплообменников. - В сб.: Холодильная техника и технология. Киев, Техніка, 1975, вып. 21, с. 69-72.

2. Заблоцкая Н.С., Притула В.В., Калина Л.М. Некоторые вопросы изготовления матричных металлополимерных рекуператоров. - В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1975, № 2, с. 32-38.

3. Заблочкая Н.С., Притула В.В. К вопросу расчета матричных эффективных рекуператоров для криогенных установок. - В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1975, № 2, с. 37.

4. Заблочкая Н.С., Притула В.В., Бодял С.В., Калина Л.М. Определение оптимальных характеристик теплообменников криогенных установок. - В сб.: Холодильная техника и технология. Киев, Техніка, 1976, вып. 23, с. 42-44.

5. Заблочкая Н.С., Притула В.В., Артемов В.Н., Парамонов Ю.М. Технология производства низкотемпературных матричных теплообменников. - В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1976, № 3, с. 35.

6. Заблочкая Н.С., Притула В.В., Бодял С.В. Оценка продольного теплового потока в рекуперативных теплообменниках криогенных установок. - В сб.: Холодильная техника и технология. Киев, Техніка, 1977, вып. 25, с. 43-45.

7. Притула В.В., Алексеев В.П. Исследование теплофизических свойств композиционных материалов для создания высокоэффективных компактных матричных теплообменников. - Депон. в ВИНТИ АН СССР, № 3926-78 Деп., 1978. - 16 с.

8. Притула В.В., Заблочкая Н.С. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик матричных теплообменных аппаратов. Депон. в ВИНТИ АН СССР № 3925-78 Деп., 1978. - 10 с.

9. Притула В.В., Заблочкая Н.С. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик сетчатых каналов матричных теплообменников. - В кн.: Исследование процессов тепло- и массопереноса. Киев, Наукова думка, 1979, с. 45-49.

10. Заблочкая Н.С., Притула В.В., Вивденко А.А. Расчетный анализ сетчатых металлополимерных рекуператоров - В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1981, № 1, с. 28-29

11. Заблочкая Н.С., Притула В.В. Оценка эффективности теплообменного аппарата с учетом продольного теплопереноса вдоль его стенок. - В сб.: Химическое и нефтяное машиностроение. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1981, № 1, с. 29-30.

и в тезисах докладов международной, всесоюзной и республиканской конференции:

1. "Создание и применение трубчатой и пластинчатой теплообменной аппаратуры", Таллин, 1974.

2. "Вторая Всесоюзная научно-техническая конференция молодых специалистов по холодильной технике и технологии", Москва, 1975.

3. „XIV International Congress of Refrigeration", Moscow, 1975.

4. "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха", Ташкент, 1977.

5. Математическое моделирование и системный анализ теплообменного оборудования", Киев, 1978.

6. "VI Всесоюзная конференция по теплообмену", Минск, 1980.

7. "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств", Днепропетровск, 1980.

По результатам работы получено три авторских свидетельства и положительное решение по заявке:

1. А.с. 638835 (СССР). Пакет пластинчатого теплообменника /В.П. Алексеев, Н.С. Заблочкая, А.А. Сотников, В.В. Притула, С.В. Бодял. - Оpubл. Б.И., 1978, № 47.

2. А.с. 673833 (СССР). Пакет пластинчатого теплообменного аппарата /В.П. Алексеев, А.А. Сотников, Н.С. Заблочкая, В.В. Притула, Л.Л. Штейн. - Оpubл. Б.И., 1979, № 26.

3. А.с. 707663 (СССР). Способ изготовления поверхностного теплообменника /А.В. Вольнер, В.И. Ланда, Д.М. Боуш, В.В. Притула. - Оpubл. Б.И., 1980, № 1.

4. Полож. решение от 27.02.80. Способ изготовления поверхностного теплообменника /Д.М.Боуш, В.И.Климов, В.В.Притула.- Заявл. 7.08.79 № 2807062 /24-06, МКИ 3 В 2ГД 53/04.