

ММ 190464

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

Юрий Артемьевич ШЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СЕТЧАТЫХ
МАТРИЦАХ**

**(Специальность 05.04.03 — Гидравлические машины,
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)**

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доктор технических наук, и. о. профессора Микулин Е. И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Поляев В. М.,
кандидат технических наук Ревякин А. В.

Ведущее предприятие — указано в решении Ученого Со-
вета.

Автореферат разослан « . . . » 1973 г.

Защита диссертации состоится « . . . » 1973 г.

на « . . . » в «Энергомашинно-
сти» адресу: Лефортовская
на « . . . » с.

в библиотеке МВТУ.

ч « . . . », заверенный пе-
л « . . . » Ученый Совет учи-
манская ул., д. 5.

Е. С. Фролов

ММ 190464

л

Интенсивное развитие криогенной техники в нашей стране и за рубежом вызывает потребность в создании высокоэффективных и компактных теплообменных аппаратов, удельная поверхность теплообмена которых достигает $40\,000\text{ м}^2/\text{м}^3$.

Относительно просто такие аппараты регенеративного и рекуперативного типов могут быть получены с теплопередающими поверхностями, образованными матрицами из мелких металлических сеток с диаметром проволоки до 30 мк.

Матрицы из таких сеток применяются в регенераторах газовых холодильных машин (ГХМ), работающих по обратному циклу Стирлинга, циклу Джиффорда и Мак-Магона, циклу Такониса и др., а также в сетчатых рекуперативных аппаратах нового типа, применяющихся в некоторых низкотемпературных установках. Высокая термодинамическая эффективность ГХМ и других низкотемпературных установок существенно зависит от КПД теплообменных аппаратов. Для проектирования теплообменников такого типа требуются надёжные данные по коэффициентам теплоотдачи α и сопротивления ξ в сетчатых матрицах. Такие данные по теплообмену в настоящее время отсутствуют, т.к. известные сведения имеют между собой большое различие.

Целью настоящего исследования являлось получение надёжных данных для расчёта аппаратов с поверхностью теплообмена в виде матриц из мелких сеток, работающих при стационарном и пульсирующем режимах движения потока. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии и приложения.

В первой главе проведён обзор известных исследований теплообмена и аэродинамического сопротивления в сетчатых матрицах, рассмотрены известные попытки аналитического решения задач теплообмена и движения потока в матрице как в пористом слое, дан краткий обзор влияния пульсирующего режима движения потока на теплообмен при поперечном обтекании тонких цилиндров и течении внутри каналов, проведён анализ рассмотренных работ и поставлены задачи настоящего исследования.

Наиболее распространёнными являются данные И. Копшеджа и А. Лондона для матриц из сеток с размерами: $d_{np} = 0,198 \pm 0,04\text{ мм}$ и $\alpha_{qc} = 0,19 \pm 3,91\text{ мм}$ (рис. I, область I). С этими данными принципиально совпадают результаты исследований О. Саундерса и С. Смоленака на матрицах из сеток примерно этого диапазона размеров. В этих исследованиях относительная длина матриц в

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1190464

Шевич Ю.А. Исследование т

направлении движения потока не превышала значений $H/D_3 = 8,5 \pm 38$, где H — размер матрицы в направлении движения потока, а D_3 — эквивалентный диаметр каналов матрицы.

Результаты, полученные М. Садовским на матрицах из сеток № 004 ± № 05 ($\alpha_{np} = 0,08 \pm 0,217$ мм, $\alpha_{pp} = 0,04 \pm 0,5$ мм), сильно отличаются от данных выше упомянутых исследований меньшей интенсивностью теплоотдачи (до десяти раз), при этом испытанные модели матриц имели большую относительную длину — $H/D_3 = 210 \pm 740$ (рис. I, область II).

Анализ этих данных, а также данных, полученных для других насадочных поверхностей, элементы которых образуют каналы сложной формы (шариковые матрицы, каналы образованные двумя рифленными поверхностями и др.), приводит к выводу о влиянии относительной длины матрицы на теплообмен внутри неё. Однако систематизированные сведения о стабилизации теплообмена по длине матриц отсутствуют.

Из обзора работ по теплообмену в сетчатых матрицах следует, что характер влияния зазоров между сетками матрицы на интенсивность теплообмена и сопротивление в них также не установлен. Такие разреженные матрицы образуются в сетчатых рекуперативных теплообменниках из-за их конструктивных особенностей, приводящих к снижению продольной теплопроводности аппарата.

Анализ известных аналитических решений задач течения и теплообмена внутри матрицы как пористом слое, приводит к выводу о применимости этих приближенных решений только для случаев вязкого режима течения потока — режима, редко встречающегося в теплообменных аппаратах низкотемпературных установок и поэтому не представляющего в данном случае практического интереса. Кроме того, рассматриваемые модели пористого слоя являются крайне идеализированными и мало соответствуют физической картине обтекания потоком элементов слоя. Поэтому для получения количественных зависимостей по теплообмену и сопротивлению движения потока в матрице приходится обращаться к экспериментальному методу с использованием теории подобия.

Обзор исследований по теплообмену в каналах и при поперечном обтекании тонких цилиндров (проволок) при нестационарном (пульсирующем) потоке показал определенную их противоречивость: в одних случаях значения α возрастают, в других остаются неизменными, а в некоторых и уменьшаются по сравнению со ста-

ционными. Сведения по теплообмену при периодическом движении потока в насадочных поверхностях, в том числе и сетчатых, при частотах, достигающих несколько десятков герц, вообще отсутствуют.

По результатам обзора и анализа рассмотренных в первой главе исследований были поставлены задачи настоящего исследования.

Основной задачей являлось получение надёжных зависимостей по теплообмену в матрицах из мелких сеток, необходимых для определения коэффициентов теплоотдачи в регенераторах газовых холодильных машин и сетчатых рекуперативных теплообменниках. Работа включала следующие основные этапы.

Исследование процессов теплоотдачи и сопротивления на стационарных режимах течения через плотно упакованные матрицы с разной относительной длиной — H/D_3 . Выявление влияния относительной длины плотно упакованных матриц на интенсивность теплоотдачи в них.

Определение влияния зазоров между сетками разреженной матрицы на интенсивность теплоотдачи и сопротивления в них.

Определение влияния нестационарного (пульсирующего) движения потока через матрицы на теплообмен в них по сравнению со стационарным.

Для решения поставленных задач потребовалось создать экспериментальную установку для определения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления в матрицах при стационарных и пульсирующих режимах движения потоков. Установка обеспечивала замер турбулентных и закономерных периодических пульсаций потока на входе и выходе из матриц.

Во второй главе дано описание экспериментальной установки и рассмотрены особенности метода исследования, который обеспечивал одинаковую точность полученных результатов на моделях, состоящих из разного количества сеток — от одной до нескольких сотен и в широком диапазоне чисел Re .

В силу ряда обстоятельств, рассмотренных в работе, косвенный (нестационарный) метод определения α в матрицах не удовлетворял условиям решения поставленных задач. Поэтому был принят метод прямого определения α между матрицей и протекающим через неё воздушным потоком. Применение прямого метода для матриц, состоящих из очень мелких сеток ($\alpha_{pp} = 30 \div 80$ мк и $\alpha_{гч} = 40 \div 112$ мк) поставило ряд задач по осуществлению

эксперимента.

Стационарный режим теплообмена в моделях обеспечивался непрерывным генерированием тепла в объёме матрицы переменным электротоком при непрерывном отводе этого тепла воздушным потоком.

Модель матрицы представляла собой пакет, набранный из отдельных полосок сеток, торцы которых припаивались к токораспределяющим пластинам. Такой пакет помещался в трёхсекционный прямоугольный канал текстолитового корпуса.

Измерения температурного напора между матрицей и потоком на входе и выходе, а также температур потока, осуществлялись в центральной секции канала, свободной от искажающего влияния токораспределяющих пластин на температурное поле матрицы. В работе проведена расчётная оценка глубины допустимого искажения температурного поля матрицы и показано, что в наиболее неблагоприятном случае искажение температурного поля в центральной секции не превышало $0,08^{\circ}\text{C}$, что при замеряемых температурных напорах, больших на два порядка, не существенно. Кроме того, равномерность температурного напора как на входе, так и на выходе из матрицы проверялась экспериментально.

Особое внимание уделялось точности измерений температурных напоров, производимых с помощью дифференциальных микротермопар в комплекте с потенциометром высокого класса точности $\rho - 306$. Сложность заключалась в измерении температуры сетки, диаметр проволоки которой был такой же, как и электрода термopары. Для уменьшения теплоотвода по электродам термopара выполнена так, что одним её электродом являлся сам объект измерения температуры - сетка из бронзовой проволоки, а вторым - никелевая или константановая проволочка диаметром 30 мк, приваренная с помощью контактной электросварки к одной из проволочек плетения сетки, не нарушая при этом геометрию её плетения в месте сварки. Один электрод значительно уменьшил искажение температуры сетки в месте спая, но не исключил полностью.

Если Δt_{θ} - действительная разность температур между сеткой и потоком, то замеренная - Δt_{α} будет несколько выше. Связь между Δt_{θ} и Δt_{α} устанавливалась с помощью известной зависимости (I), полученной для тонкой пластины, в которой теплопроводность материала пластины - λ_n заменялась на эффективную теплопроводность сетки вдоль плоскости её плетения - $\lambda_{\text{эф}} =$

$$= \lambda_n \frac{n \cdot S_{np}}{S} \quad (S_{np} - \text{площадь сечения проволоки,}$$

n - число проволок сетки, попавших в сечение площадью - S):

$$\frac{\Delta t_{\partial} - \Delta t_u}{\Delta t_{\partial}} = \frac{1}{1 + 2\pi \left(\lambda_{\partial p} \frac{\delta}{\Lambda} \right) \varepsilon \varepsilon_s \cdot K_1(\varepsilon \varepsilon_s) \cdot K_0(\varepsilon \varepsilon_s)} \quad (I)$$

Специальная экспериментальная проверка подтвердила возможность такой корректировки Δt_u для определения Δt_{∂} .

В работе рассмотрен вопрос определения среднего температурного напора - Δt между матрицей и потоком при изменении коэффициента теплоотдачи по длине матрицы по закону $\alpha = c x^{-n}$ имеющему место в данном случае. В результате установлен характер наилучшего приближения, позволяющий определять Δt по известным $\Delta t_{\partial x}$ и $\Delta t_{\partial x}$ с допустимой погрешностью, численно оценённой для наиболее вероятного диапазона значений $0,5 < n < 0,9$

В третьей главе приведены результаты исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления в плотно упакованных и разреженных матрицах $X/$ при стационарном режиме, проведен анализ полученных результатов, исследовано стабилизирующее влияние сеток матриц на возмущенный поток и, как следствие этого, на теплообмен в них.

Испытано 22 модели плотно упакованных матриц из сеток с геометрически подобным плетением ($t/d_{np} = 2,29 + 2,88 \approx const$): № 004, № 007I и № 01I2 (ГОСТ 3584-58), включающие в свой диапазон ещё II типоразмеров, выпускаемых промышленностью. Геометрические параметры девятнадцати основных моделей приведены в таблице I.

Полученные результаты по теплообмену дали четкое расхождение характеристик $Nu = f(Re)$ для матриц с разным числом сеток, т.е. матриц различной относительной длины - H/D_3 (рис. I сплошные прямые). С увеличением H/D_3 теплообмен в матрицах протекал менее интенсивно. Максимальные значения Nu имели место для одной - двух сеток. Относительная длина матриц менялась в широком диапазоне: $H/D_3 = 1,1 + 212$.

Падение интенсивности теплообмена с увеличением H/D_3 свидетельствует о стабилизации процесса теплообмена внутри пакета сеток, причем с ростом числа Re влияние H/D_3 на

$X/$ В плотно упакованной (идеальной) матрице сетки касаются друг друга, в разреженной матрице между сетками имеется зазор.

теплообмен в матрице уменьшается. Матрицы из разных размеров сеток, но с равными отношениями H/D_3 имели одинаковый, в пределах точности эксперимента, средний по длине безразмерный коэффициент теплоотдачи - $\overline{Nu}$.

С ростом H/D_3 $\overline{Nu}$ матриц асимптотически приближается к постоянному значению при данном Re (см. рис. 2). Практически влияние тепловой стабилизации на $\overline{\alpha}$ становится мало заметным при $H/D_3 \geq 100$, сохраняясь до значений $H/D_3 = 200$ при малых числах Re . Для матриц с $H/D_3 \leq 50$ влияние относительной длины на $\overline{\alpha}$ наиболее ярко выражено.

Полученные результаты по теплообмену обобщены с учётом стабилизации $\overline{\alpha}$ по длине матрицы. Критериальное уравнение средней теплоотдачи для матриц из плотно уложенных мелких сеток при значениях $H/D_3 = 2 + 200$ имеет следующий вид:

$$\overline{Nu} = 4,21 Re^{0,47 \left(\frac{H}{D_3} \right)^{-\frac{0,8}{Re^{0,25}}}} \quad (2)$$

Для матриц с $H/D_3 \geq 200$ справедливо уравнение

$$\overline{Nu} = 0,05 Re^{0,85} \quad (8)$$

Уравнения (2) и (8) применимы при $Re = 10 + 500$ и характеризуют средние по длине коэффициенты теплоотдачи с погрешностью обобщения менее 20%. Значения критерия Re определялись по скорости фильтрации потока в матрице и D_3 .

Полученные данные подтвердили результаты исследований Копеджа и Лондона для матриц с малым $H/D_3 \leq 3,5 + 38$. Для матриц с $H/D_3 \geq 100$, т.е. наиболее часто встречающихся в регенераторах ГХМ, данные этих авторов являются завышенными. Данные М. Садовского по теплоотдаче в матрицах из мелких сеток не подтвердились и их следует считать существенно заниженными.

Влияние относительной длины на аэродинамические характеристики матриц также установлено: с увеличением H/D_3 коэффициент сопротивления - ξ уменьшается, но не во всем диапазоне чисел Re , а только ближе к его большим значениям. При $H/D_3 \geq 15 + 20$, значения ξ стабилизируются и хорошо согласуются с данными других авторов для матриц из сеток этих размеров и одинаковой пористости - ρ .

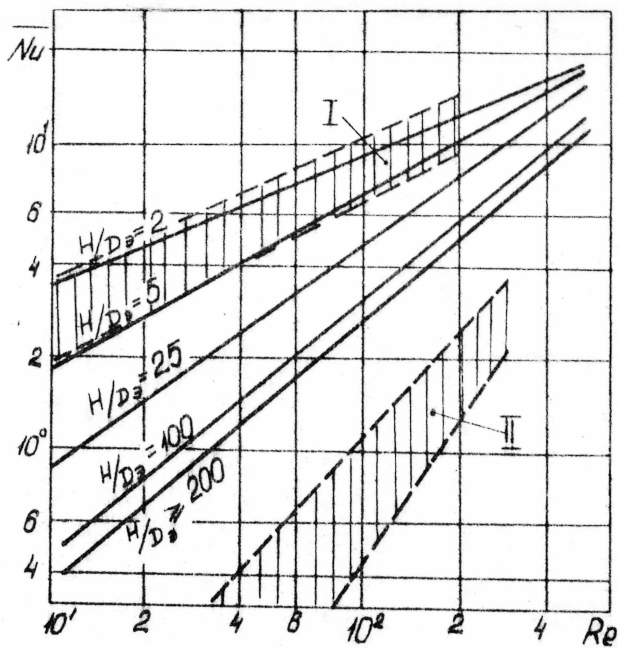


Рис. 1 Теплоотдача в сетчатых матрицах
 I - данные Коппелджа и Ландана; II - данные
 Габоровского; — данные настоящего исследования

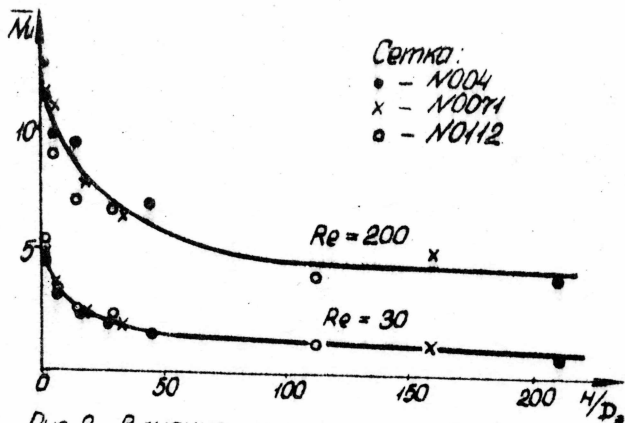


Рис. 2 Влияние относительной длины
 матриц на теплоотдачу.

Таблица № I

№ пп	Модель матрицы	Сетка №	Число сеток в пакете N	d_{np}	$d_{яч}$	ρ	$S_{уд} \cdot 10^{-4}$	D_3	$\frac{H}{D_3}$
		—	—	мм	мм	м ³ /м ³	м ² /м ³	мм	—
1.	М-3В	004	I	0,03	0,04	0,66	4,49	0,059	I, I
2.	М-3Б	004	2	0,08	0,04	0,66	4,49	0,059	2, 2
3.	М-3Г	004	5	0,03	0,04	0,66	4,49	0,059	5, 5
4.	М-3Ж	004	15	0,08	0,04	0,66	4,49	0,059	16, 5
5.	М-3Е	004	25	0,08	0,04	0,66	4,49	0,059	27, 5
6.	М-3И	004	4I	0,08	0,04	0,66	4,49	0,059	45
7.	М-2Б	004	209	0,08	0,04	0,706	3,87	0,073	212
8.	М-4Е	007I	I	0,055	0,07I	0,665	2,46	0,108	I, 2
9.	М-4А	007I	2	0,055	0,07I	0,665	2,46	0,108	2, 4
10.	М-4Б	007I	5	0,055	0,07I	0,665	2,46	0,108	6
11.	М-4Г	007I	16	0,055	0,07I	0,665	2,46	0,108	17, 7
12.	М-4Д	007I	30	0,055	0,07I	0,665	2,46	0,108	33
13.	М-4Е	007I	140	0,055	0,07I	0,65	2,59	0,1	160
14.	М-5Б	0112	I	0,08	0,112	0,693	1,54	0,18	I
15.	М-5А	0112	2	0,08	0,112	0,693	1,54	0,18	2
16.	М-5Б	0112	5	0,08	0,112	0,693	1,54	0,18	5
17.	М-5Г	0112	15	0,08	0,112	0,693	1,54	0,18	15
18.	М-5Д	0112	30	0,08	0,112	0,693	1,54	0,18	30
19.	М-5Е	0112	110	0,08	0,112	0,66	1,8	0,142	113

При $H/D_3 \geq 15 + 20$ значения ξ матриц из разных размеров сетки (№ 004, № 007, № 0112) при ρ , равной пористости идеальной матрицы — $\rho_{ид}$ (соответственно 0,66, 0,665, 0,693), совпадают между собой и аппроксимированы зависимостью

$$\xi = \frac{65}{Re} + \frac{8}{Re^{0,3}} \quad (4)$$

Зависимость (4) применима в диапазоне $Re = 10 + 500$ с погрешностью не превышающей $\pm 10\%$.

Недостаточно плотная упаковка сеток в пакете приводит к увеличению пористости матрицы и коэффициента сопротивления. Более подробно влияние плотности упаковки на характеристики матрицы рассмотрено ниже.

Анализируя полученные результаты, взаимодействие потока и теплообмен одной сетки и пакета, состоящего из большого количества сеток, рассматривается как два предельных случая: внешнее обтекание проволоки плетения сетки, которое можно сравнить с характеристиками поперечно обтекаемого цилиндра, и внутреннее течение по многочисленным каналам матрицы, которое можно сравнить с течением и теплообменом в каналах сложной формы — криволинейных с периодически меняющейся формой и размерами сечения. Такое сравнение в работе проведено и оно показало, что интенсивность теплоотдачи одной сетки и поперечно обтекаемого тонкого цилиндра совпадают, а теплоотдача в пакете из большого количества плотно уложенных сеток ниже и по своей интенсивности ближе к известным данным по теплоотдаче в каналах сложной формы.

Аналогичная закономерность наблюдается и для характеристик по сопротивлению: характер изменения ξ при переходе от одной сетки к пакету сеток подобен изменению ξ при переходе от сопротивления поперечно обтекаемого цилиндра к сопротивлению в каналах сложной формы.

Для более полного понимания процессов взаимодействия матрицы с потоком в работе исследовано стабилизирующее влияние пакета сеток на возмущенный (турбулентный) поток.

Измерение степени турбулентности потока — $\varepsilon = \frac{\sqrt{W'^2}}{W}$ на входе — $\varepsilon_{\text{вх}}$ и выходе — $\varepsilon_{\text{вых}}$ из матрицы производилось с помощью термоанометра типа "DISA", датчики которого располагались на расстоянии 2,5 мм от крайних сеток на входе и выходе из матрицы. Измерения производились при средних скоростях потока — $\overline{W} \approx 8 \pm 27$ м/сек на 4-х моделях из сетки № 004 с числом сеток в каждой 2; 5; 15 и 30 шт. ($H/D_3 = 2,2 \pm 38$) в изотермических условиях.

Значения $\varepsilon_{\text{вх}}$ при испытании матриц с разным количеством сеток изменялись одинаково и слабо зависели от скорости потока, уменьшаясь с 3,8% до 3,2% при увеличении последней. Значения $\varepsilon_{\text{вых}}$ при малых скоростях движения потока более, чем на порядок ниже значений $\varepsilon_{\text{вх}}$. С ростом средней скорости потока $\varepsilon_{\text{вых}}$ увеличивается, причём, чем меньше сеток в пакете, тем $\varepsilon_{\text{вых}}$ выше. Если для пакета из 30 сеток при $\overline{W} = 22 \pm 28$ м/сек $\varepsilon_{\text{вых}} \approx 0,4\%$, то для 2-х сеток $\varepsilon_{\text{вых}} = 1,1\%$.

В работе приведены осциллограммы турбулентных пульсаций потока на входе и выходе из матриц разных моделей и режимов течения.

Минимальные значения частот турбулентных пульсаций были порядка нескольких сотен герц. Полученные характеристики отчётливо показывают детурбулизирующее, стабилизирующее действие сеток на возмущенный поток.

Расстояние характеристик $\varepsilon_{\delta,ix} = f(\overline{w})$, а также характеристик $\xi = f(Re)$ в зависимости от количества сеток в матрице указывает на то, что при малом числе сеток в пакете режим течения в матрице, близкие к турбулентному, наступают при меньших средних скоростях движения потока. Следовательно, в матрицах, состоящих из большого числа плотно упакованных сеток, режим течения потока через входные слои сеток может существенно отличаться от режима течения в глубине матрицы.

Активное взаимодействие входных слоев сеток с возмущенным потоком активизирует и процесс теплообмена в них по сравнению с глубинными слоями. Более интенсивный теплообмен во входных слоях сеток объясняется тем, что возмущенный поток обладает поперечными составляющими пульсации скорости - v' и u' , присутствие которых приводит к дополнительной циркуляции теплоносителя в застойных зонах, образующихся в многочисленных пересечениях проволок сетки друг о другом, что сопровождается включением в активный теплообмен дополнительных поверхностей. Мгновенные значения v' и u' входного потока с изотропными турбулентными свойствами оценивались по продольной составляющей - w' , которая достигала величин более 2 м/сек.

В этой же главе диссертации рассмотрен характер влияния зазоров между сетками на теплообмен и сопротивление разреженных матриц. Исследовались две модели из сетки № 004. Величина зазоров между сетками определялась толщиной бумажных прокладок - δ . В таблице 2 приведены основные параметры испытанных разреженных матриц и для сравнения одной плотно упакованной с близким (к разреженным) количеством сеток.

Таблица 2

Обозначение матрицы	Сетка	d_{np} мм	$d_{яч}$ мм	Число сеток в матрице N	Толщ. бумажной рамки δ мм	Пористость ρ $\frac{m^3}{m^3}$	$S_{уд}$ $\frac{m^2}{m^3}$	D_3 мм	$\frac{H}{D_3}$ —	$\frac{P}{P_{уд}}$ —
МР-1	004	0,08	0,04	88	0,14	0,855	$1,8 \cdot 10^4$	0,19	26,5	1,8
МР-2	004	0,08	0,04	88	0,22	0,875	$1,55 \cdot 10^4$	0,226	29,8	1,88
М-ЗИ (идеальная)	004	0,08	0,04	41	0,00	0,66	$4,49 \cdot 10^4$	0,059	42	1

Значения $\overline{\alpha}$ и ΔP разреженных матриц выше соответствующих, величин плотно упакованной матрицы. Присутствие зазоров между сетками повышало $\overline{\alpha}$ матрицы в 1,3+1,65 раза при одновременном повышении её сопротивления в 1,25 + 1,45 раза.

Безразмерные характеристики ($\overline{Nu}$, Re , ξ) разреженных матриц определялись по геометрическим параметрам идеальной матрицы (ρ_{ud} , $D_{э.уд}$, $H_{уд}$), состоящей из того же количества и размера сетки, а величина зазоров между сетками учитывалась отношением $-\frac{\rho}{\rho_{ud}}$.

Располагая данными по сопротивлению в плотно упакованных и разреженных матрицах из сетки № 004 разной действительной пористости в диапазоне $\rho = 0,66 + 0,855$, имея совпадение коэффициентов ξ для плотно упакованных матриц по зависимости (4), результаты по сопротивлению плотных и разреженных матриц для всего диапазона типо-размеров испытанных сеток обобщены едиными зависимостями:

$$\xi = \frac{59}{Re^{0,74}} \left(\frac{\rho}{\rho_{ud}} \right)^{1,35} \quad (5a)$$

для $10 \leq Re \leq 40$

$$\xi = \frac{19}{Re^{0,44}} \left(\frac{\rho}{\rho_{ud}} \right)^{1,35} \quad (5b)$$

для $40 < Re \leq 300$.

Зависимости (5) применимы для матриц с $H/D_3 \geq 15 + 20$ с погрешностью обобщения $\pm 7\%$ и числом Re , определяемым по параметрам идеальной матрицы.

Важным результатом исследования разреженных матриц явилось то, что $\overline{\alpha}$ в этих матрицах, как и следовало ожидать из анализа результатов, полученных для плотных матриц, выше, чем в плотно упакованных. Поэтому в разреженных матрицах значения $\overline{\alpha}$ могут быть определены по зависимостям (2) и (8), гарантирующим их минимальные величины.

В четвертой главе приведены результаты исследования теплообмена при пульсирующем режиме движения потока через сетчатые матрицы, моделирующем периодический режим движения потока в регенераторах ГХМ.

Характер пульсаций был близок к синусоидальной форме изменения скорости во времени при однонаправленности движения потока. Такое моделирование является приближенным, но оно позволяет выявить влияние на теплообмен главной особенностью движения потока через насадку регенератора - периодического изменения расхода, сопровождающегося то ускорением потока ($\frac{dG}{d\tau} > 0$), то его замедлением ($\frac{dG}{d\tau} < 0$). В ряде работ по исследованию течений и теплообмена показано, что величина ускорения потока является важным показателем процессов, протекающих при нестационарном режиме движения потока и может рассматриваться как независимая переменная в виде безразмерного критерия нестационарности K .

При моделировании периодического режима движения потока в регенераторах ГХМ соблюдались следующие условия: изменение расхода во времени близко к синусоидальной форме; диапазон частот периодического изменения расхода в модели - $f = 12 + 25$ гц соответствовал диапазону частот в регенераторе; максимальное значение критерия нестационарности модели - $K_m = \frac{dG}{d\tau} \frac{D_s^2}{16 \cdot G \cdot \nu} = 1,4 \cdot 10^{-8}$ входило в диапазон максимальных значений для регенераторов.

Пульсирующий режим движения потока создавался пульсатором, действие которого заключалось в периодическом обрасывании в атмосферу части воздуха, поступающего в матрицу. Такой способ осуществления пульсаций позволил сохранить неизменной проточную часть установки. В процессе эксперимента средние по времени (за период пульсаций) температуры и давления потока, его расход и температурные напоры между матрицей и потоком замерялись теми же датчиками и приборами, что и при стационарном режиме. Частота пульсаций определялась по числу оборотов электродвигателя пульсатора. Величины амплитуд пульсаций расхода (скорости) воздуха и форма пульсаций определялись с помощью термоанемометра "DISA". На пульсирующем потоке испытано 4 модели матриц из сетки № 004, основные параметры которых с характеристиками пульсирующего потока приведены в таблице 3.

Испытание 4-х плотно упакованных матриц из одного размера сетки, но с разным их количеством позволяло выявить влияние относительной длины матриц на теплообмен в них и при периодическом режиме движения потока.

Таблица 8

Мо- дель	D_3 мм	N шт	$\frac{H}{D_3}$	ρ $\text{м}^3/\text{м}^3$	f Гц	$A = \frac{4G}{\rho_{cp}}$ %	$\frac{4G}{\Delta t}$ $\text{кг}/\text{сек}^2$	ΔG $\text{кг}/\text{час}$	K_M (max)
М-8Б	0,059	2	2,2	0,66	12,5 25	2,5+15,8	0,0214+ +0,214	1,5+8,1	0,88. 10^{-8}
М-8Г	0,059	5	5,5	0,66	12,5 25	8,5+ 21	0,045+ +0,19	3,6+6,9	0,49. 10^{-8}
М-8Ж	0,059	15	16,5	0,66	12,5 25	4,5+89	0,045+ +0,17	2,8+6,2	0,98. 10^{-8}
М-8Д	0,059	30	38	0,66	12,5 25	6,8+86	0,0246+ +0,125	1,8+4,5	1,4. 10^{-8}

Сравнение по критерию Nu интенсивности теплоотдачи матриц при пульсирующем и стационарном режимах показывает их фактическое совпадение при соответствующих H/D_3 . Изменение основных параметров пульсирующего потока (K_M , f , A) в пределах, указанных в таблице, не влияло на теплообмен.

Осциллограммы пульсирующего потока показывали, что входной поток кроме закономерных низкочастотных пульсаций скорости возмущен высокочастотными турбулентными пульсациями скорости в продольном и поперечном направлениях, которые по своей форме и величине равны турбулентным пульсациям стационарного потока при соответствующих средних скоростях. Стабилизирующее действие матриц на турбулентные пульсации в этом случае аналогично их действию при стационарном режиме: с увеличением количества сеток (или H/D_3) турбулентные пульсации потока гасятся матрицей и тем эффективнее, чем больше сеток в пакете. Низкочастотные закономерные колебания скорости потока не гасятся матрицей.

Дополнительное возмущение потока продольными низкочастотными колебаниями скорости по всему свободному сечению матрицы не интенсифицирует теплообмен в ней. При пульсирующем режиме, как и при стационарном, сохраняется влияние H/D_3 матрицы на теплообмен, и зависимости (2) и (8), полученные при стационарном режиме, справедливы для определения α при периодическом режиме движения потока и поэтому могут быть использованы для расчета регенераторов ГХМ с сетчатой насадкой.

Значения коэффициентов сопротивления - ξ матриц при пульсирующем потоке оказались выше стационарных в 1,08+1,45 раза. С увеличением критерия нестационарности это отличие росло.

ВЫВОДЫ

1. Исследован теплообмен и аэродинамическое сопротивление в матрицах из мелких сеток (№ 004 + № ОИ2) при стационарном режиме. Установлено влияние относительной длины — H/D_3 матриц из плотно уложенных сеток на теплообмен и аэродинамическое сопротивление в них. С увеличением H/D_3 коэффициенты теплоотдачи матриц существенно уменьшаются. Максимальное влияние стабилизирующего фактора на средний коэффициент теплоотдачи наблюдается для матриц с $H/D_3 \leq 100$, а на коэффициент аэродинамического сопротивления для матриц с $H/D_3 \leq 15 + 20$.

2. Полученные результаты по теплообмену обобщены едиными критериальными уравнениями (2) и (8), которые существенно корректируют известные до сих пор зависимости по теплообмену в матрицах из мелких сеток.

3. Замеренные значения степени турбулентности потока на входе — $\varepsilon_{\text{вх}} = 8,8 + 8,2\%$ и выходе — $\varepsilon_{\text{вых}} = 0,2 + 1,8\%$ из матриц указывают на сильное стабилизирующее действие матрицы на возмущенный поток, причем с увеличением относительной длины матрицы (или числа сеток в пакете) это действие усиливается. Этот факт дает основание считать, что степень турбулентности входного потока влияет на аэродинамические характеристики входных слоев сеток матрицы и, как следствие этого, на теплообмен в них.

4. Установлено влияние зазоров между сетками на интенсивность теплообмена и сопротивление в разреженных матрицах. Присутствие зазоров повышает коэффициент теплоотдачи при одновременном повышении аэродинамического сопротивления матриц. Полученные результаты по сопротивлению как в разреженных, так и в матрицах с плотно уложенными сетками обобщены критериальными уравнениями (5а) и (5б) с учётом реальной и идеальной пористости матриц.

5. Экспериментально исследовано влияние нестационарного (пульсирующего) режима движения потока на теплообмен в матрицах с плотно уложенными сетками при условиях, моделирующих периодический характер течения потока через насадку регенератора. Влияние пульсирующего режима движения потока на теплообмен в матрицах не обнаружено, следовательно, для определения коэффициентов теплоотдачи в матрице, выполняющей роль насадки регенератора ГХМ, могут быть использованы зависимости, справедливые для стационарного режима движения потока. Одновременно установлено,

что аэродинамическое сопротивление матриц на пульсирующем потоке выше, чем на стационарном.

6. Полученные, в целом, результаты исследования позволяют обоснованно подходить к расчёту и проектированию теплообменных аппаратов с поверхностью теплообмена, образованной матрицами из мелких сеток.

Основные результаты работы докладывались на:

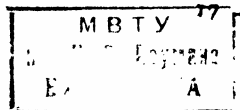
1. Юбилейной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина, МВТУ им.Баумана, г.Москва, 1970.
2. Республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", ЛТИХП, г.Ленинград, 1971.

По материалам работы опубликованы статьи:

1. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Теплоотдача и сопротивление в сетчатых насадках. "Техника низких температур". Сборник материалов республиканской научной конференции, ЛТИХП, г.Ленинград, 1971.
2. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Экспериментальное исследование теплообмена в сетчатых матрицах. "Инженерно-физический журнал", том XXII, № 6, 1972.
3. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Теплоотдача и сопротивление в сетчатых насадках. "Глубокий холод и кондиционирование". Сборник трудов МВТУ им.Баумана, № 149, 1972.
4. Шевич Ю.А. Точность измерения температуры мелкой сетки контактным методом. "Глубокий холод и кондиционирование". Сборник трудов МВТУ им.Баумана № 149, 1972.
5. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. Теплообмен и сопротивление в сетчатых матрицах. "Криогенное, кислородное машиностроение". ЦИТИКИМНЕФТЕМАШ", № 8, 1972.

Получено авторское свидетельство:

1. Шевич Ю.А., Микулин Е.И. "Устройство для определения коэффициента теплоотдачи от металлической насадки к омываемому ее газовому потоку". Авторское свидетельство СССР № 266281, 1970. Бюллетень № II, 1970.



М 190464