

М 4572/45
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЕРТАЕТСЯ

На правах рукописи

ГАЛКИН Александр Петрович

УДК 532.685:536.24

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОРИСТЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1986

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

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Хвостов В.И.

Официальные оппоненты- доктор технических наук, главный
научный сотрудник Полоцкий В.С.
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Куракин А.А.

Ведущее предприятие - Киевский политехнический институт

Защита диссертации состоится "20" августа 1987 г.
в "14.00" на заседании специализированного Совета К.053.15.05.
"Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" в Московс-
ком высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
Москва, Лефортовская набережная, д. 1, корпус факультета "Энерго-
машиностроение".

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью учреждения, просим выслать в адрес Совета: 107005, Моск-
ва 2-я Бауманская ул. д. 5. МВТУ им. Н.Э.Баумана, ученому сек-
ретарю Со

С д
Баумана.

ВТУ им. Н.Э.

Авт

Уче
специали
К.053.15

ФИМОВ С.И.

М457 М415

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ускорение научно-технического прогресса предъявляет повышенные требования к таким показателям различных теплотехнических устройств, как их энергонасыщенность, надежность и материалоемкость. В этой связи особенно перспективными являются разработка и применение теплообменников, в которых передача теплоты осуществляется в ходе испарения жидкости в пористых структурах (пористых элементах) с капиллярной подачей жидкости навстречу внешнему однородному тепловому потоку. Благодаря использованию скрытой теплоты парообразования и чрезвычайно развитой внутриспоровой поверхности элементов в таких теплообменниках обеспечивается высокая интенсивность теплообмена, а благодаря использованию капиллярного потенциала – отпадает необходимость в дополнительных затратах энергии на перемещение рабочей жидкости. Применение указанных теплообменников особенно эффективно в условиях отсутствия силы тяжести.

Испарение жидкости из пористых испарительных элементов (ПИЭ) с капиллярной подачей жидкости изучено недостаточно. Имеющиеся расчетные модели и экспериментальные данные относятся в основном к процессам, реализуемым в тепловых трубах либо в системах тепловой защиты. Использование этих данных для расчета ПИЭ может привести к значительным погрешностям вследствие того, что исходные условия процессов различны.

Цель работы заключается в разработке методики расчета рабочих и предельных характеристик пористых испарительных элементов теплообменных устройств, установлении влияния на них различных режимных, структурных и теплофизических факторов, экспериментальной проверке полученных результатов. Для достижения этой цели были разработаны физическая и математическая модели процесса, создан экспериментальный стенд и проведены расчетные и экспериментальные исследования.

Научная новизна. В данной работе предложена новая физическая модель процесса испарения жидкости с открытой поверхности менисков, расположенных в пористой структуре на различных уровнях; посредством первоначального исследования процессов в отдельной элементарной ячейке идеализированной пористой структуры и последующего перехода к осредненным макроскопическим величинам проведено математическое описание этого процесса; разработана

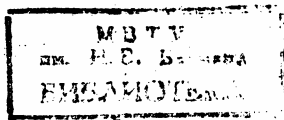
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1457445

Галкин А.П. Разработка моде



новая методика расчета его рабочих и предельных характеристик. Впервые проведена расчетная и экспериментальная оценка влияния на них функции распределения пор по их размерам, что позволило сформулировать практические рекомендации к ПИЭ.

На защиту выносятся указанные новые результаты.

Практическая ценность. Результаты работы позволяют выполнять расчетную оценку пределов работоспособности ПИЭ, используемых в теплообменных устройствах; сформулировать требования к структурным и теплофизическим параметрам этих элементов, обеспечивающим их надежное функционирование в заданных диапазонах тепловых нагрузок, тепловых потерь и внешних гидравлических сопротивлений; рассчитывать такие характеристики ПИЭ, как расход теплоносителя, общее гидравлическое сопротивление и температуру горячей поверхности, соответствующие различным установленным режимам работы.

Реализация работы. Разработанная методика используется при расчете реальных теплообменных систем, содержащих ПИЭ.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на У-й Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Усть-Нарва, 1985г.), на XVI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ИТГФ АН УССР (Київ, 1985г.), на I-й Республиканской школе-семинаре "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Алушта, 1985г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано шесть печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы, приложений. Работа содержит 175 страниц, включая 107 страниц машинописного текста, 61 рисунок, 4 таблицы, список литературы на 13 страницах, состоящий из 117 наименований работ, и приложения на 11 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен критический обзор литературных ис-

точников, посвященных исследованию испарения жидкостей из гористых структур. Обзор показал, что наиболее полно механизм передачи тепла и генерации пара изучен для таких случаев реализации этого процесса, в которых имеются принципиальные возможности визуального наблюдения и использования методов скоростной кино- и фото съемки (кипение на затопленной парогенерирующей поверхности; в смоченном пористом слое, моделирующем испарительную зону тепловой трубы; перистое испарительное охлаждение с объемным тепловыделением). Для процесса, реализуемого в пористых элементах теплообменников с капиллярной подачей жидкости, указанные возможности отсутствуют, что существенно затрудняет создание адекватных ему физической и математической моделей. В этой связи автором предпринят тщательный анализ экспериментальных данных для изученных случаев реализации процесса. На основании анализа установлено, что механизм образования паровой фазы определяется условиями формирования пристенного перегретого слоя жидкости. Рассмотрение этих условий для ПИЗ, характерными особенностями работы которых являются малые значения диаметров пор и реализуемых тепловых нагрузок, позволяют утверждать, что фазовый переход в них происходит посредством испарения со свободной поверхности менисков. Поскольку для поровых каналов различных размеров равенства движущих сил и сил сопротивления достижимы только при различных положениях менисков, принято, что мениски расположены в пористой структуре на разных уровнях.

Кратко рассмотрены работы, использующие модельные представления пористой среды, а также посвященные специфическому явлению заравнивания поровых каналов, сопровождающему движение в порах большинства представляющих практический интерес жидкостей.

Проведенный анализ опубликованных работ позволил сформулировать задачи настоящего исследования следующим образом:

1. Разработать обоснованные и достаточно полные физическую и математическую модели, учитывающих основные особенности реальных процессов: протяженный характер области фазового перехода, обусловленный испарением с открытой поверхности менисков разного уровня; сужение поровых каналов в области структуры, занятой жидкостью.

2. На основе этих моделей разработать методику расчета рабочих и предельных характеристик ПИЗ и выявить влияние на них основных геометрических и режимных факторов.

тояние по поверхности; внутренний коэффициент теплоотдачи настолько велик, что температуры жидкости и скелета практически совпадают. В этих условиях процесс в каждой отдельной элементарной ячейке описывался уравнениями движения (Хазена-Пуэйзеля), неразрывности и температурного поля. Считалось, что движущий капиллярный напор линейно возрастает по мере заглубления мениска, изменяясь от нуля на поверхности $y = \delta$ до своего максимального значения при максимальном заглублении $y = (1 - n)\delta$, где n - безразмерная длина участка изменения капиллярного напора. В результате решения исходной системы уравнений получены выражения для полей температур и давлений в отдельной ячейке, а также в неявном виде функциональные зависимости удельного расхода $\bar{G}$, отнесенного к единице площади капилляра, и безразмерного положения мениска ℓ от диаметра капилляра:

$$\Delta p = \frac{32 G \delta v'}{a^2} + \frac{32 (v'' - v') \lambda_{32}}{a^2 \pi c_p''} \ln \frac{q}{G \pi (\ell'' - i_0) + q_{\text{пот}}} \quad (1)$$

$$q = \frac{\pi (\ell'' - i_0) a^2 \Delta p}{32 \delta [v'' - \ell (v'' - v')] \exp \frac{\pi c_p'' (\ell - 1) \Delta p a^2}{32 \lambda_{32} [v'' - \ell (v'' - v')]}} \quad (2)$$

где $\pi = a^2/D^2$ - пористость элементарной ячейки;
 λ_{32} - эффективный коэффициент теплопроводности парового участка;
 $q_{\text{пот}}$ - плотность теплового потока, проходящего через нижнюю торцевую поверхность ячейки.

Переход к описанию процесса в осредненных макроскопических величинах (расход $\bar{G}$, давление $\bar{p}$, температура $\bar{t}$), имеющих смысл для каждого текущего сечения y , осуществлялся на основе балансовых соотношений массы, импульса и энергии. Для этого последние первоначально записывались с помощью осредненных величин $\bar{G}$, $\bar{p}$, $\bar{t}$, а затем суммировались по всем элементарным ячейкам. Полученное выражение для осредненного расхода имело вид:

$$\bar{G} = \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} G^2 a^2 f(a) da \quad (3)$$

Интегральные выражения для текущих значений температуры и давления в различных областях определялись различным образом. Например, в области испарения:

$$\bar{t}(y) = \frac{\pi N}{4} \int_{y_1}^y \left\{ \left[\lambda_{31} \int_{Q_*}^{Q_{**}} \left(\frac{dt}{dy} \right)_1 a^2 f(a) da + \lambda_{32} \int_{Q_{min}}^{Q_*} \left(\frac{dt}{dy} \right)_2 a^2 f(a) da + \right. \right. \\ \left. \left. \lambda_{32} \int_{Q_{**}}^{Q_{max}} \left(\frac{dt}{dy} \right)_2 a^2 f(a) da \right] / \bar{\lambda}_3(y) \right\} dy + \bar{t} \Big|_{y=y_1} \quad (4)$$

$$\bar{p}(y) = \frac{\pi N}{4\rho} \int_{Q_*}^{Q_{**}} a^2 G^2 f(a) da + \frac{\pi N}{4\rho} \left[\int_{Q_{min}}^{Q_*} a^2 G^2 f(a) da + \int_{Q_*}^{Q_{max}} a^2 G^2 f(a) da \right] \\ + 8\pi N \left\{ v' \int_{y_1}^y \int_{Q_*}^{Q_{**}} G f(a) da dy + v'' \int_{y_1}^y \int_{Q_{min}}^{Q_*} G f(a) da dy + \right. \quad (5) \\ \left. + \int_{y_1}^y \int_{Q_{**}}^{Q_{max}} G f(a) da dy \right\} + \bar{p} \Big|_{y=y_1}$$

где $\frac{N}{\bar{\lambda}_3(y)}$ - общее количество капилляров;
 $\bar{\lambda}_3(y)$ - эффективный коэффициент теплопроводности в области испарения;
 $\left(\frac{dt}{dy} \right)_1, \left(\frac{dt}{dy} \right)_2$ - градиенты температур соответственно в жидкостной и паровой областях отдельной ячейки;
 y_1 - координата начала области испарения (максимально заглубленного мениска).

Интегрирование велось отдельно для групп капилляров, занятых в текущем сечении паром либо жидкостью, причем пределы интегрирования Q_* , Q_{**} зависели от координаты сечения y .

Полученные интегральные выражения полностью определяют температурное и гидродинамическое состояние пластины в зависимости от ее структурных, капиллярных и теплофизических параметров и исходных режимных условий.

Третья глава содержит описание результатов расчетного исследования, проведенного с использованием полученных зависимостей.

Поскольку осредненные величины определяются локальными расходами и координатами менисков, первоначальному исследованию подвергались процессы в отдельных элементарных ячейках (с помо-

стью трансцендентных выражений (1) и (2)). Выявлено, что основной особенностью рассматриваемых процессов в широком диапазоне плотностей тепловых потоков является расположение менисков вблизи обогреваемой поверхности. На рис.2 приведены типичные результаты расчетов испарения жидкости из отдельных чёчек варикапиллярной асбестовой пластины толщиной 0,15 мм, пористостью 0,43 в отсутствие внешних гидравлических сопротивлений $\Delta p_{\text{пот}}$ и атмосферном давлении со стороны обогреваемой поверхности. При значениях плотности теплового потока вплоть до $0,4 \cdot 10^5$ Вт/м² заглупления менисков не превышают 4 %. Увеличение тепловой нагрузки сверх отмеченного значения приводит к последовательному увеличению заглуплений менисков, которые в капиллярах малого диаметра могут оказаться весьма значительными. При этом в остальной массе капилляров мениски остаются расположенными вблизи обогреваемой поверхности.

Распределение менисков для той же пластины при наличии внешних гидравлических сопротивлений показаны на рис.3. В этом случае монотонный характер рассматриваемых зависимостей нарушается вследствие того, что к собственному гидравлическому сопротивлению, развиваемому в каждом отдельном капилляре, добавляется еще и постоянное значение внешних гидравлических сопротивлений. На-

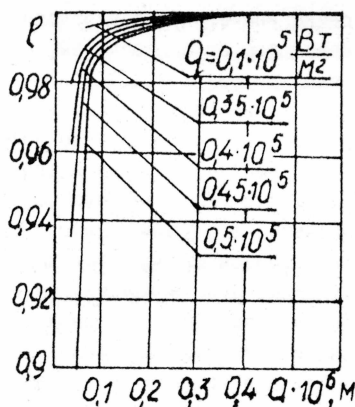


Рис.2. Зависимость безразмерной координаты мениска от диаметра капилляра в отсутствие

$$\Delta p_{\text{пот}}$$

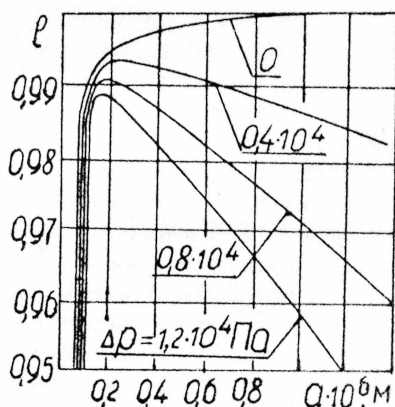


Рис.3. Зависимость безразмерной координаты мениска от диаметра капилляра при наличии $\Delta p_{\text{пот}}$ ($Q = 0,50 \cdot 10^5$ Вт/м²) 7

оборот, в капиллярах наименьших диаметров это влияние незначительно.

В результате анализа ограничивающих факторов, имеющих место при работе различных пористых испарительных систем, выявлено, что нарушение работоспособности пористых элементов с капиллярной подачей жидкости обуславливают два фактора: наступление капиллярного ограничения и термическое разрушение материала структуры, вызванное его существенным прогревом. По этой причине диапазон работоспособности ПИЭ определяется расчетом общего гидравлического сопротивления и температуры его горячей поверхности и сопоставлением последних с максимально допустимыми их значениями.

Установлено, что особенности процессов в отдельных ячейках обуславливают характерную особенность функционирования пластины в качестве испарительного элемента теплообменного устройства: зависимость предельных воспринимаемых значений тепловой нагрузки от внешних сопротивлений и тепловых потерь через жидкостную поверхность. При этом увеличение внешних сопротивлений вследствие уволочения заглубления менисков приводит к уменьшению предельных значений воспринимаемой тепловой нагрузки как в случае наступления капиллярного ограничения, являющегося наиболее часто встречающимся ограничением, так и в случае термического разрушения материала структуры.

Присутствие в разработанной методике расчета ряда параметров пористой структуры (функции распределения пор по их размерам, пористости, толщины, характеристик капиллярности и т.д.) позволило исследовать их влияние на рабочие и предельные характеристики работы ПИЭ. Особенный интерес представляло исследование влияния параметров распределения пор по их размерам, которое проводилось на примере 4-х выбранных распределений (Розина-Раммлера, логарифмически-нормального, δ -распределения и нормального). Расчеты показали, что наиболее заметным образом сказывается параметр однородности диаметров пор структуры. Его увеличение приводит к существенному увеличению предельных значений тепловой нагрузки и паропроизводительности во всем диапазоне значений внешних гидравлических сопротивлений. Большое влияние оказывает также и абсолютный уровень значений диаметров пор — смещение функции распределения в сторону больших диаметров пор вызывает существенное повышение предельных тепловых нагрузок. Однако это смещение может сопровождаться более значительным снижением предель-

ных нагрузок при наличии внешних гидравлических сопротивлений. Отмечено, что при некоторых значениях рассмотренных параметров распределения предельные значения тепловой нагрузки, определяемые из условия наступления капиллярного ограничения, могут оказаться настолько высокими, что на первом плане выходит уже ограничение, связанное с термическим разрушением материала структуры.

Расчеты, выполненные для различных выбранных видов функции распределения, установило, что увеличение равномерности распределения диаметров пор приводит к увеличению продольной тепловой нагрузки в такой мере, в какой происходит уменьшение относительного числа пор малого диаметра, обладающих наибольшим собственным гидравлическим сопротивлением.

Исследование влияния других характеристик структуры, а также различных теплоносителей показало, что наиболее широкие диапазоны работоспособности ПИЭ достигаются применением структур меньшей толщины, с большими значениями пористости и длины участка стабилизации капиллярного напора и использованием воды в качестве рабочей жидкости.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальной установки, методов определения используемых в работе характеристик пористых образцов (функции распределения пор по их размерам, пористости, проницаемости), а также методики подготовки и проведения основного эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились в ИВТУ им. Н.Э. Баумана на специально разработанной установке, состоящей из испарителя, контрольно-измерительного стенда и систем: подачи рабочей жидкости, конденсации пара, подачи охлаждающей жидкости и охлаждения верхней водяной полости. Основными частями испарителя, в котором организовывался рабочий процесс парообразования, являлись нагреватель, плита-датчик теплового потока и исследуемый образец. Последний разделял испаритель на жидкостную и паровую полости и помещался между двумя металлокерамическими пластинами, одна из которых (никелевая), находящаяся в водяной полости, сохраняла жесткость композиции, другая (моная), обращенная к нагревателю, обеспечивала равномерность подаваемого теплового потока. Проницаемость металлокерамических пластин подбиралась на 2 порядка выше проницаемости образцов, что гарантировало отсутствие их влияния на протекание процесса. Плита-датчик теплового потока имела с одной стороны профрезерованные ка-

навки для отвода пара и располагалась между пористой пластиной и нагревателем. Конденсация пара на стенках корпуса предотвращалась вспомогательным нагревателем. Для визуализации процесса со стороны жидкостной полости устанавливалось кварцевое смотровое стекло.

В качестве рабочей жидкости в экспериментах использовалась дистиллированная вода, предварительно деаэрированная кипячением в течение 2-х часов. Имитация внешних гидравлических сопротивлений реальной теплообменной системы достигалась расположением уровня жидкости в деаэраторе ниже уровня образца на определенную величину ΔH , задание различных значений тепловых потерь через жидкостную поверхность образца - различными режимами охлаждения верхней водяной полости.

Измерение температуры на поверхностях пластины и в различных точках испарителя осуществлялось 38 хромель-копелевыми термомпарами, термо-ЭДС которых регистрировались электронными ампервольтметрами Ф-30 класса точности 0,1. Для измерения температуры паровой поверхности использовался также и медный термометр сопротивления. Термометры были оттарированы в комплекте с измерительной аппаратурой, что позволило снизить максимальную суммарную погрешность до 0,5 К.

Исследуемыми образцами являлись минерально-волоконистые пленки, выполненные из асбеста, каолина, кремнезема, карбида кремния и полимерноуглеродного материала. Пористость их определялась взвешиванием сухого и пропитанного водой образцов. Проницаемость исследовалась отдельно по жидкости и по воздуху на специальных стендах. Распределение пор по их размерам в работе определялось методом вытеснения жидкости из пор, основанном на условии равновесия смачивающей жидкости в капилляре. Увеличивая давление под залитым водой образцом, определенные поры заставляют "раскрываться". Размеры "раскрывающихся" пор обусловлены величиной приложенного давления, количество их - интенсивностью нарастания расхода при переходе от одного значения давления к другому. По результатам проведенных измерений для образцов строились гистограммы.

Анализ погрешностей показал, что итоговые величины определялись с ошибкой не более 10 %.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования характеристик работоспособности ПИЗ; указаны способы

определения некоторых величин, необходимых для конкретных расчетов выбранных образцов; проведено сопоставление полученных экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальное исследование ставило целью визуальное наблюдение процесса, измерение рабочих и предельных значений температур горячей и холодной поверхностей образцов, их паропроизводительности, а также предельных значений подаваемого теплового потока в зависимости от значений тепловых потерь и нивелирного перепада между образцом и уровнем жидкости в расходной емкости. Проведенными наблюдениями установлена удовлетворительная работоспособность элемента в широком диапазоне значений тепловой нагрузки вплоть до ее некоторого предельного значения $q_{пр}$, конкретного для каждого заданного сочетания тепловых потерь и нивелирного перепада, при котором на жидкостной поверхности пластины появляются участки, покрытые мелкими паровыми пузырьками.

Измерения локальных и осредненных температур горячей поверхности показали, что в основном диапазоне тепловых нагрузок эти температуры оказывались равными температуре насыщения (при отсутствии нивелирного перепада) либо незначительно превышающими ее (при наличии перепада). Практически постоянной остается и температура холодной поверхности пластины.

При подходе тепловой нагрузки к предельному значению, а также в случае установления все больших перепадов и тепловых потерь с жидкостной полости наблюдалось увеличение локальных и осредненных значений температуры горячей поверхности. При этом локальные значения температуры могут заметно превышать ее осредненные значения. Опытами установлено, что для максимально реализуемых значений нивелирного перепада и тепловых потерь (составляющих соответственно $1,5$ м и $0,56 \cdot 10^4$ Вт/м²) значения температуры на некоторых участках горячей поверхности образцов № 2 и № 9 оказывались столь высокими, что при этом происходили локальные изменения свойств материала образцов, приводящие к наступлению более раннего капиллярного ограничения. В подавляющем большинстве случаев, однако, нарушение работоспособности ПИЭ не сопровождалось каким-либо значительным прогревом горячей поверхности и происходило вследствие наступления капиллярного ограничения на некоторых участках при отсутствии изменений структурных и капиллярных свойств.

Измерение предельных тепловых потоков и паропроизводитель-

ности показало, что увеличение нивелирного перепада во всех исследованных образцах приводит к их снижению, увеличение тепловых потерь — к увеличению предельных тепловых потоков при неизменной перепроизводительности.

Для экспериментальной оценки влияния структурных параметров ПИЭ на характеристики их работоспособности производился отбор и изготовление образцов, различающихся по одному либо нескольким параметрам. Так, сравнительным анализом большой серии образцов, выполненных из одних асбестовых волокон удалось подобрать образцы № 3 и № 4 с различными распределениями пор (рис. 4) и близкими значениями пористости и толщины. Прокаткой между вальками ис-

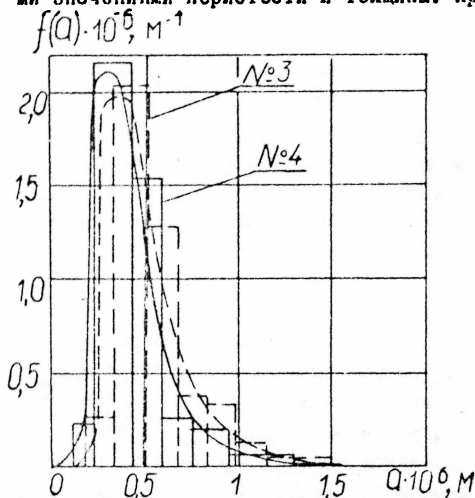


Рис. 4. Гистограммы и аппроксимирующие функции распределения диаметров пор для образцов № 3 и № 4

ходного образца № 8 (полимерноуглеродный материал) изготавливались образцы № 9 и № 10, имеющие отличные значения пористости и толщины, прокаткой образца № 1 (асбест) получен образец № 2, также с отличными от исходного значениями пористости и толщины. Из анализа гистограмм распределения диаметров пор используемых образцов (рис. 4) установлено, что распределения диаметров хорошо аппроксимируются логарифмически-нормальной функцией распределения.

Определение предельных тепловых нагрузок образцов № 3 и № 4 показало, что смещение функции распределения в сторону меньших значений диаметров пор при аналогичных исходных условиях процесса приводит к их снижению. В случае образцов № 2, № 9 и № 10, в которых наряду со смещением имело место также и увеличение неравномерности распределения, снижение предельных тепловых нагрузок оказывается столь значительным, что перекрывает эффект их увеличения от одновременного уменьшения толщины образцов.

Проверка правомерности принятых физических допущений осуще-

ставлялась на основе сопоставления экспериментальных данных с результатами расчетов, проведенных с учетом облитерации (завращения) поровых каналов при движении в них жидкости. Для этого логарифмически-нормальная функция распределения, аппроксимирующая гистограмму каждого испытуемого образца, при расчете области структуры, занятой жидкостью, смещалась в сторону малых значений диаметров пор таким образом, что посчитанные с ее помощью значения жидкостной проницаемости оказывались равными значению этой величины, полученному в специально поставленных экспериментах.

На рис.5 и рис.6 экспериментальные значения предельно воспринимаемой тепловой нагрузки и осредненной температуры горячей поверхности образцов из асбеста № 3 и № 4 изображены условными знаками, расчетные – сплошными линиями. Расхождение предельных тепловых нагрузок во всех исследованных случаях не превышает 21 %, причем для образцов, обладающих меньшими значениями диаметров исходных волокон, оно составляет 6–14 %. Измеренные значения температуры горячей поверхности, как правило, оказывались несколько выше расчетных вследствие изменения структурных свойств (функции распределения диаметров пор, пористости), имеющего место вблизи поверхности реальных образцов. Наибольшее расхождение (до

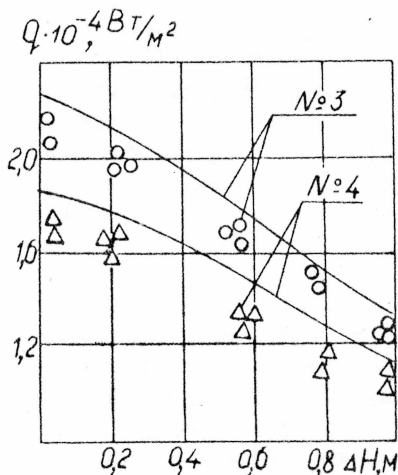


Рис.5. Предельная тепловая нагрузка для образцов № 3 и № 4

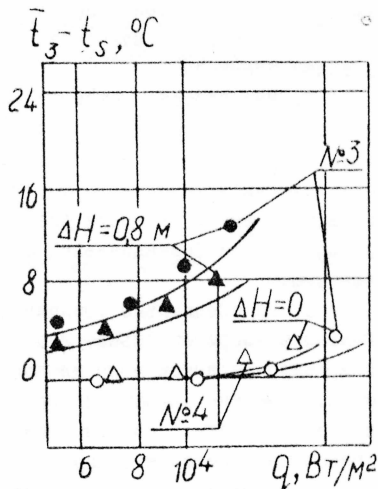


Рис.6. Значения температуры горячей поверхности образцов № 3 и № 4

24 %) наблюдается для тонких образцов.

Сопоставление полученных результатов показывает их удовлетворительную согласованность во всем диапазоне исследованных режимов. Все это позволяет рекомендовать разработанную методику как для целей подбора необходимых режимных условий и параметров структуры, обеспечивающих требуемые характеристики работоспособности, так и для целей оценки работоспособности уже сконструированных ПИЭ.

Проведенные исследования позволили сформулировать практические рекомендации по выбору свойств ПИЭ, согласно которым увеличение диапазона работоспособности ПИЭ может быть достигнуто увеличением однородности и равномерности распределения диаметров пор, увеличением пористости и коэффициента теплопроводности скелета, уменьшением толщины и длины участка стабилизации капиллярного напора, использованием воды в качестве рабочей жидкости.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена физическая модель процесса испарения из пористых элементов с капиллярной подачей жидкости, согласно которой испарение происходит в прямых цилиндрических капиллярах разного диаметра с менисков, расположенных на различной глубине в толще элемента.

2. Разработано математическое описание предложенной физической модели, основанное на рассмотрении процесса в отдельной элементарной ячейке и последующем переходе к осредненным макроскопическим величинам. Существенным и новым в этой модели является учет неодинаковости диаметров пор пористой структуры использованием дифференциальной функции распределения пор по их диаметрам.

3. На специально созданной экспериментальной установке проведено экспериментальное исследование испарения дистиллированной деаэрированной воды из пористых минерально-волокнистых пластин. Измерены рабочие и предельные значения температуры горячей поверхности образцов и их паропроизводительности, а также предельные значения воспринимаемого ими теплового потока в зависимости от нивелирного перепада и тепловых потерь через жидкостную поверхность. Удовлетворительное совпадение полученных расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует о правоте принятых исходных допущений.

4. В результате расчетов, проведенных на основе предложенных физической и математической моделей, установлено, что характерной особенностью процесса является сосредоточенность менисков вблизи обогреваемой поверхности. Однако при приближении тепловой нагрузки к своему предельному значению, либо при наличии существенных внешних гидравлических сопротивлений, углубление менисков, различное в капиллярах разного диаметра, становится значительным.

5. Численными расчетами определено, что в диапазоне практически встречающихся значений параметров ПИЭ нарушение их работоспособности происходит вследствие наступления капиллярного ограничения. Визуальными наблюдениями жидкостной полости, а также анализом макроскопической неоднородности структуры используемых элементов установлено, что это ограничение наступает на отдельных участках, в то время как основная часть элемента работает в допредельном режиме.

6. На основе анализа расчетных и экспериментальных данных установлено существенное влияние на рабочие и предельные характеристики ПИЭ:

- а) тепловых потерь и внешних гидравлических сопротивлений;
- б) параметров, характеризующих распределение пор по их диаметрам (равномерности распределения пор по различным диаметрам, однородности и уровня значений диаметров пор);
- в) других структурных и теплофизических параметров (пористости, толщины, длины участка стабилизации капиллярного напора, коэффициента теплопроводности скелета, теплофизических свойств теплоносителя).

7. На основе анализа результатов проведенного исследования сформулированы практические рекомендации по выбору свойств испарительных элементов.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Галкин А.П. Использование вариационной модели для расчета эффективных характеристик испарения из пористых структур // Тез. докл. У Всесоюзной школы-семинара "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок", - М., 1985. - С. 30.

2. Галкин А.П., Хвостов В.И. Исследование процесса испарения из капиллярно-пористой пластины в локальных величинах на основе ва-

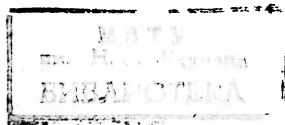
рикапиллярной модели пористой среды // Известия ВУЗов, Машиностроение. - 1985. - № 12. - С. 48-52.

3. Галкин А.П., Иванов М.И. Границы рабочих режимов при испарении воды из минерально-волоконистых пластин // Известия ВУЗов, Машиностроение. - 1986. - № 4. - С. 61-64.

4. Галкин А.П., Хвостов В.И. Аналитическая модель процесса испарения жидкости из капиллярно-пористой пластины на основе варикапиллярного представления пористой структуры // Тр. МЭИ. - 1986. - № 91. - С. 59-68.

5. Галкин А.П., Хвостов В.И. Разработка методики расчета испарения жидкости из капиллярно-пористой пластины на основе варикапиллярной модели пористой среды / МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1986. - 19 с. - Деп. в ВИНТИ 01.07.86, № 4784-86В.

6. Хвостов В.И., Галкин А.П., Иванов М.И. Некоторые модели тепло-массообмена при испарении жидкостей из капиллярных структур // Аналитические методы расчета процессов тепло- и массопереноса: Тез. докл. Всесоюзного совещания. - Душанбе, 1986. - С. 218-219.



Д-59676 от 4.03.87

Заказ № 340

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ