

М 489479
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

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

НА ДЛМ
НЕ ВЗНЕТСЯ

На правах рукописи

ИВАНОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ

УДК 532.685:518.61

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОРИСТЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ
НЕРАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОТОКОВ ТЕПЛОТЫ И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
ПО ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Специальность 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 - 1989

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

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

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Елисеев В.Н.,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Яновский Л.С.

Ведущее предприятие - НПО "Криогенмаш"

Защита диссертации состоится "12" VI 1989 г.
в "1532" на заседании специализированного Совета
К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы тепло-
техники" в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.
Баумана по адресу:

107005, Москва, Лефортовская набережная, д. I,
кафедра факультета "Энергомашиностроение".

двух экземплярах, за-
высылать в адрес

анская ул., д. 5,
зному секретарю

я в библиотеке

авг 1989 г.

ЕДИМОВ С.И.

Актуальность работы. При разработке теплотехнических систем важнейшим направлением теоретических и экспериментальных исследований является интенсификация процессов теплообмена. В пористых испарительных теплообменниках, системах термостатирования и тепловой защиты в качестве одного из новых перспективных методов организации теплообмена используются процессы испарения и кипения в капиллярно-пористых структурах, обладающие высокой эффективностью за счет использования скрытой теплоты парообразования и высокой интенсивностью вследствие чрезвычайно развитой внутренней поверхности теплообмена. Использование капиллярного потенциала пористой структуры для транспорта жидкости делает такие системы особенно привлекательными при работе в условиях пониженной гравитации и невесомости.

Разработка и проектирование новых, высокоэффективных теплотехнических систем требует разработки экспериментальных и численных методов исследования процессов испарения в пористых структурах и создание на их основе методов расчета пористых испарительных элементов.

Цель работы заключается в создании методики расчета рабочих и предельных характеристик пористых испарительных элементов на основе численного и экспериментального исследований, включающих разработку двумерных физической и математической моделей процесса, исследование влияния на них режимных, теплофизических и геометрических факторов, экспериментальное подтверждение результатов расчета.

Научная новизна. На основе предложенных новых двумерных физической и математической моделей процесса испарения в пористых элементах при капиллярной подаче жидкости разработана существенно новая методика расчета, учитывающая неравномерное по поверхности распределение потоков теплоты и массы теплоносителя, вследствие наличия непроницаемого для пара участка поверхности, на котором осуществляется подвод теплоты в пористый элемент. Впервые получены обобщенные безразмерные соотношения, позволяющие рассчитывать рабочие и предельные значения плотности тепловых потоков и расходов испаряемой жидкости, исходя из капиллярных и теплофизических характеристик пористых элементов и

I



свойств теплоносителя, геометрии греющей поверхности и условий работы испарительной системы. Методом теории подобия получены определяющие критерии, описывающие процесс испарения из пористой структуры при капиллярной подаче жидкости и исследовано их влияние на характеристики процесса. Впервые разработан численный метод решения двумерной задачи испарения как сопряженной задачи гидродинамики и конвективного теплообмена для жидкостной и паровой областей пористой структуры с учетом парообразования на поверхности фазового перехода. Подготовлена программа расчета на ЭЕМ и выполнено численное исследование в широком диапазоне изменения определяющих критериев. С учетом изменения геометрии греющей поверхности проведено экспериментальное обследование, подтвердившее справедливость двумерной модели и расчетных соотношений.

Автором защищаются: двумерная модель, расчетные соотношения и методика расчета, подтвержденные результатами экспериментального и численного исследований.

Практическая ценность. Результаты работы позволяют выполнить расчетную оценку пределов работоспособности пористых испарительных элементов при капиллярной подаче жидкости, рассчитать характеристики процесса при заданных значениях режимных, теплофизических и геометрических критериев, сформулировать практические рекомендации по выбору оптимальных параметров пористой испарительной системы.

Реализация работы. Разработанная методика используется при расчете характеристик испарительного процесса в теплотехнических системах, включающих капиллярно-пористые структуры.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ИТФ АН УССР (г. Киев, 1986 г.), на II Республиканской школе-семинаре "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (г. Алушта, 1987 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, приложений. Работа содержит 155 страниц, включая 98 страниц машинописного текста, 37 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 113 наименований, 2 приложения.

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

В первой главе проведен критический анализ работ по испарению жидкостей из пористых структур и сформулированы задачи исследования.

Обзор работ показал, что условия отвода пара в значительной мере оказывают влияние на механизм парообразования и интенсивность теплообмена. Коэффициенты теплоотдачи при испарении с поверхности менисков жидкости, обращенных навстречу тепловому потоку ("перезернутые мениски") существенно (на порядок) превосходят коэффициенты теплоотдачи при кипении в фитилях обычных тепловых труб. В пористых структурах активация центров парообразования внутри капиллярных каналов затруднена вследствие высоких перепадов, необходимых для начала кипения.

Отмеченные особенности являются характерными для работы испарительных элементов из мелкопористых минерально-волоконистых материалов при умеренных тепловых нагрузках ($1 - 100 \text{ кВт/м}^2$) и капиллярной подаче жидкости. Это позволяет считать, что фазовый переход осуществляется путем испарения со свободной поверхности менисков. Парообразование путем испарения предполагает ничтожно малую толщину поверхности испарения (фронт); имеет место также локальное равенство температур пористого скелета и теплоносителя (однотемпературная модель).

Для объяснения устойчивости процесса испарения при капиллярной подаче жидкости используется известная модель "краевого слоя". Хорошая корреляция экспериментальных и расчетных данных при толщине краевого слоя, равной полной толщине структуры, позволяет предположить линейное изменение величины капиллярного давления по толщине.

Принято, что при капиллярной подаче жидкости (скорости очень малы) течение в пористой структуре носит

ламинарный характер и справедлив закон Дарси. При этом уравнения движения в пористой среде отличаются от уравнений движения вязкой жидкости тем, что отсутствуют инерционные члены, а силы вязкого трения выражены силами сопротивления Дарси.

В опубликованных работах разработаны и проанализированы лишь одномерные (плоско-фронтальные) модели испарения, не учитывающие геометрию пористой структуры и греющей поверхности в реальных конструкциях теплотехнических систем. Теоретические и экспериментальные работы, в которых учитывалось бы неравномерное по поверхности распределение потоков теплоты и массы теплоносителя на характеристики процесса, отсутствуют.

Результаты работы целесообразно представить в обобщенном безразмерном виде.

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

1. Разработать двумерные физическую и математическую модели процесса испарения.
2. Разработать численный метод решения двумерной задачи и подготовить программу расчета на ЭВМ.
3. На основе теории подобия привести математическую модель к безразмерному виду, выявив критерии подобия, описывающие данный процесс.
4. Выполнить численное и экспериментальное исследование.
5. Провести сопоставление результатов расчетного и экспериментального исследований.
6. Обобщить полученные результаты и получить расчетные соотношения для характеристик испарения.

Во второй главе на основании результатов обзора литературы разработаны двумерные физическая и математическая модели процесса испарения из пористых структур при капиллярной подаче жидкости и неравномерном распределении потоков теплоты и массы теплоносителя вследствие наличия непроницаемого для пара участка поверхности. На рис. 1. показана расчетная ячейка ABCD, выделенная из пористой пластины I, питаемой сверху жидкостью и обогреваемой

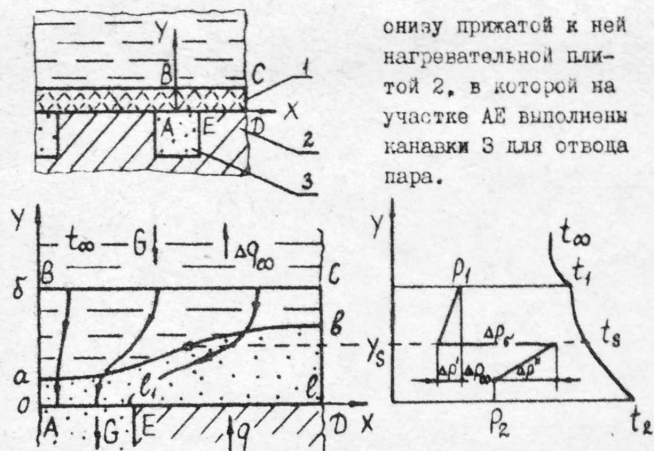


Рис. 1. Физическая модель процесса

В отличие от одномерной, в этой модели фронт испарения *об* искривлен.

Математическая модель процесса включает уравнения неразрывности, движения (закон Дарси) и энергии для жидкостной и паровой областей пористой пластины. Условия однозначности включают граничные гидродинамические и тепловые условия на жидкостной и паровой (для проницаемого и непроницаемого участков) поверхностях, условия симметрии на боковых поверхностях расчетной ячейки и условия сопряжения на поверхности фазового перехода. В отличие от одномерной модели испарения, где в качестве гидродинамических граничных условий задавались постоянные по величине давления, в двумерной модели используются распределение скорости или ее производных.

Методом теории подсобия получены критерии, описывающие процесс испарения из пористой пластины при капиллярной подаче жидкости в двумерной модели.

Общий вид уравнений подсобия имеет форму:

$$\mathcal{F} = f(\bar{x}; \bar{y}; \bar{q}; \Delta \bar{q}_{\infty}; \bar{t}_{\infty}; \Delta \bar{q}_{\infty}; Pe; R_{\text{exp}}^*/R_{\text{exp}}'; \ell_0; \ell_1/\ell_0) \quad (I)$$

где $\mathcal{F}$ — неопределяющий критерий подсобия;

$\bar{x} = x/\ell_0$, $\bar{y} = y/\ell_0$ — координаты;

$q = q_0$ - плотность теплового потока на непроницаемом участке;
 $\Delta p_0 = \Delta p_{\infty} / \rho_0$ - внешнее гидравлическое сопротивление системы;
 $T_{\infty} = (t_g - t_{\infty}) / \Delta t_0$ - начальная температура жидкости на входе;
 $\Delta q_{\infty} = \Delta q_0 / q_0$ - тепловые потери со стороны жидкостной поверхности;
 $Pr = \frac{w_0 \rho_0}{a_{\infty}} = \frac{\Delta p_{\infty}^{max} K}{\mu^* a_{\infty}}$ - модифицированный аналог критерия Пекле
 в пористой структуре при капиллярной подаче жидкости;

$\frac{Pr^*}{Pr_{\infty}} = \frac{\sqrt{a_{\infty}}}{\sqrt{a_{\infty}^*}}$ - безразмерный комплекс, равный отношению эффективных значений критериев Прандтля, характеризующий теплофизические свойства пористого материала и теплоносителя в паровой и жидкостной областях пористой пластины;

$e/s, e_1/e$ - критерии геометрического подобия.

Режимные и геометрические критерии и теплофизические критерии, стоящие в правой части зависимости (I), являются определяющими. В качестве неопределяющих критериев выступают: координаты фронта испарения $\bar{x}_s = x_s / l_0$; $\bar{y}_s = y_s / l_0$; скорости $\bar{u} = u / w_0$; $\bar{v} = v / w_0$; давления $\bar{p} = (p - p_s) / \Delta p_0$; и температуры $\bar{T} = (t_g - t) / \Delta t_0$ в жидкостной и паровой областях, массовый расход теплоносителя через расчетную ячейку пористой пластины $\bar{G} = G / G_0$.

При приведении системы уравнений к безразмерному виду в качестве масштабов использовались: $l_0 = \delta$; $\Delta p_0 = \Delta p_{\infty}^{max}$; $w_0 = (a_{\infty}^{max} K) / (\mu^* \delta)$; $G_0 = a_{\infty}^{max} K / \nu$; $\rho_0 = (a_{\infty}^{max} K) / (\nu \delta^2)$; $\Delta t_0 = (a_{\infty}^{max} K / \nu) / (\gamma / \lambda_{\infty})$. Двумерная задача испарения решалась численным методом.

Для расчетов гидродинамики и теплообмена в жидкостной и паровой областях пористой пластины использовался алгоритм, разработанный С.Патанкармом с сотрудниками, известный как SIMPLE, в котором дифференциальные уравнения представлены в обобщенном виде:

$$\partial(\rho F) / \partial \tau + \text{div}(\rho \vec{u} F) = \text{div}(\Gamma \text{grad } F) \quad (2)$$

Поскольку решалась стационарная задача, нестационарный член в обобщенном уравнении (2) задавался пренебрежимо малым путем назначения очень большого шага по времени. При решении уравнений движения уравнения Дарси приводились к обобщенному виду: градиент давления и сила сопротивления Дарси включались в состав источникового члена S , а инерционный и вязкостный члены задавались пренебрежимо малыми путем назначения весьма малых значений ρ и Γ .

Положение фронта испарения определялось в ходе расчетов при совместном выполнении гидродинамических и тепловых условий сопряжения. Первоначальное положение фронта задавалось произвольно в виде горизонтальной поверхности. Из теплового условия сопряжения, учитывающего парообразование, задавались скорости пара, а из гидродинамического, выражающего условие сохранения массы, скорости жидкости. Температуры жидкости и пара на поверхности фазового перехода принимались равными температуре насыщения при давлении пара в паротводном канале. Задание скорости и температур на поверхности фазового перехода (внутри расчетной ячейки) осуществлялось путем блокировки некоторой зоны расчетной ячейки (задача с нерегулярной областью). При этом, заданные на фиктивной границе значения зависимой переменной распространяются на всю блокируемую область, но не влияют на решение в интересующей области.

В результате решения системы уравнений в жидкостной и паровой областях пористой пластины рассчитывались поля давлений, удовлетворяющие уравнениям неразрывности и движения. Для найденных полей давлений осуществлялась проверка заключительного условия сопряжения – равенства перепада давлений капиллярному давлению при данной глубине расположения фронта испарения и коррекция положения фронта испарения. Для нового положения фронта вся процедура вычислений повторялась, до получения окончательного решения.

Корректность численного метода подтверждена тестовыми расчетами.

В ходе численного эксперимента исследовано влияние критериев на положение и форму поверхности испарения. Влияние режимных параметрических критериев (рис. 2) на положение и форму поверхности испарения исследовано путем сравнения кривых 2 – 5, полученных при изменении величины одного из критериев, с кривой 1. При высоких значениях тепловых потерь через жидкостную поверхность Δq_{∞} фронт испарения располагается вблизи паровой поверхности пластины (2). Уменьшение безразмерной температуры жидкости T_{∞} ведет к заглублению фронта испарения (3). При увеличении внешнего гидравлического сопротивления ΔP_{∞}

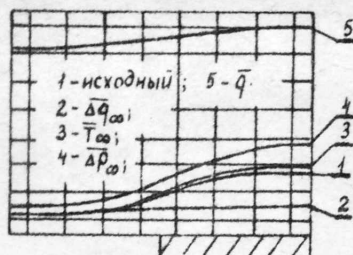


Рис. 2. Положение фронта испарения

Предельная тепловая нагрузка рассчитывалась из условия капиллярного ограничения, как такая тепловая нагрузка, при которой гидравлическое сопротивление системы достигает максимального значения капиллярного давления, развиваемого пористой структурой, что сопровождается выходом фронта испарения на жидкостную поверхность. Этой тепловой нагрузке соответствует предельный расход испаряемой жидкости.

На рис. 3 представлены поля течений и температур в пористой пластине, рассчитанные для режима I на рис. 2. При

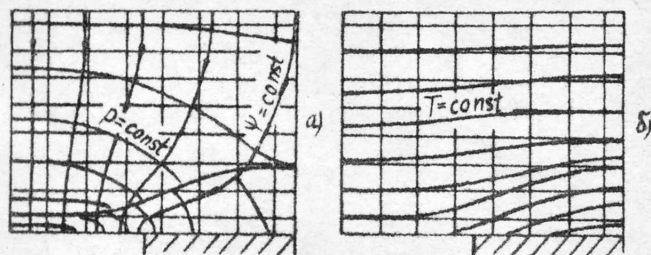


Рис. 3. Рабочий режим испарения: а - поля давлений и функций тока; б - поля температур

приближении к обогреваемой поверхности линии постоянного уровня сгущаются, особенно волизи границы, разделяющей проницаемый и непроницаемый участок. При этом течение теплоносителя ускоряется, а градиенты давлений растут. Плотность потока теплоносителя на жидкостной поверхности

пластины несколько убывает по направлению от середины отводного канала к середине непроницаемого участка. На проницаемом участке паровой поверхности отмечается резкое увеличение плотности потока массы непосредственно у кромки канала. Градиенты температур при приближении к обогреваемой поверхности пористой пластины также возрастают.

Исследование влияния определяющих критериев на предельные характеристики испарения – расход и плотность теплового потока показало:

1) с ростом внешнего гидравлического сопротивления системы $\Delta \bar{P}_0$ предельный расход уменьшается, а увеличение размеров расчетной ячейки ϵ/δ или проницаемого участка поверхности ϵ/ϵ ведут к существенному росту предельного расхода теплоносителя; влияние критериев $\bar{T}_{\infty}$, $\Delta \bar{q}_{\infty}$, R , $R_{\text{пор}}'/R_{\text{пор}}$ не существенно:

2) уменьшение внешнего гидравлического сопротивления $\Delta \bar{P}_0$, повышение безразмерной температуры жидкости $\bar{T}_{\infty}$, рост тепловых потерь через жидкостную полость $\Delta \bar{q}_{\infty}$, увеличение величины теплофизических критериев R и $R_{\text{пор}}'/R_{\text{пор}}$ а также уменьшение ϵ/δ и увеличение ϵ/ϵ ведут к увеличению предельной тепловой нагрузки.

Расчетные значения предельных характеристик в логарифмических координатах хорошо аппроксимируются линейными функциями, что в дальнейшем позволило представить расчетные соотношения в виде степенных функций.

Обработкой результатов активного численного эксперимента методом многофакторного регрессионного анализа получены расчетные зависимости для рабочих и предельных значений расходов и тепловых нагрузок:

$$\bar{G} = 1,70 \cdot 10^{-4} (\bar{q})^{1,09} (\Delta \bar{q}_{\infty})^{-0,07} (\epsilon/\delta)^{0,52} (\epsilon/\epsilon)^{-1,27} \quad (3)$$

$$\bar{q} = 5,07 (\bar{G})^{0,92} (\Delta \bar{q}_{\infty})^{0,06} (\epsilon/\delta)^{-0,48} (\epsilon/\epsilon)^{1,17} \quad (4)$$

$$\bar{q}_{\text{пор}} = 1,11 (\Delta \bar{P}_0)^{-0,03} (\epsilon/\delta)^{0,78} (\epsilon/\epsilon)^{0,75} \quad (5)$$

$$\bar{q}_{\text{пор}} = 8,00 (\Delta \bar{P}_0)^{-0,02} (\Delta \bar{q}_{\infty})^{0,14} (\epsilon/\delta)^{-0,48} (R/R_{\text{пор}})^{0,49} \quad (6)$$

Рабочие и предельные характеристики рассчитывались при испарении воды из минерально-волоконистых пористых материалов: асбеста, стекловолокна, кашина и карбида

кремния, в следующем диапазоне изменения критериев:

$$8,33 \cdot 10^{-4} \leq \Delta \bar{p}_{\infty} \leq 2,00 \cdot 10^{-1}; 1,75 \leq \bar{T}_{\infty} \leq 1,77; 0,101 \leq \Delta \bar{p}_{\infty} \leq 0,572;$$
$$4,27 \cdot 10^{-3} \leq P_e \leq 4,33 \cdot 10^{-2}; 2,30 \cdot 10^{-2} \leq P_{e, \text{exp}}'' / P_{e, \text{exp}}' \leq 7,44 \cdot 10^{-2};$$
$$0,5 \leq C / \delta \leq 7,5; 1/3 \leq C / \epsilon \leq 2/3, \quad \text{а также}$$

$$0,353 \leq \bar{q} \leq 3,64; 0,154 \leq \bar{B} \leq 4,09 \quad - \text{ для рабочих режимов;}$$

$$1,02 \leq \bar{q}_{\text{пр}} \leq 3,64; 0,501 \leq \bar{B}_{\text{пр}} \leq 4,09 \quad - \text{ для предельных режимов испарения.}$$

В выражениях (3) - (6) критерии $\bar{T}_{\infty}$, P_e , $P_{e, \text{exp}}'' / P_{e, \text{exp}}'$ не учитываются, поскольку показатели степеней при них малы и в заданном диапазоне изменения их влияние не превышает 0,01.

Представленные зависимости хорошо описывают результаты численного расчета - коэффициенты множественной корреляции составляют 0,96...0,97.

Третья глава содержит описание экспериментальной установки, методы определения характеристик пористых образцов, методики проведения и обработки результатов эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились в МВТУ им. Н.Э.Баумана на специально разработанном стенде, включающем испаритель, системы подачи рабочей жидкости и конденсации пара, контрольно-измерительную аппаратуру.

В ходе эксперимента измерялись: расход теплоносителя, плотность теплового потока через плиту-датчик, величина нивелирного перепада давлений, начальная температура жидкости, температуры на жидкостной и паровой поверхностях испарительных элементов, давление и температура окружающей среды. Тепловые потери через жидкостную полость определялись расчетно-экспериментальным методом.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, тщательно дегазированная кипячением. Для транспорта рабочей жидкости использовался капиллярный потенциал пористой структуры, при этом уровень жидкости в дегазаторе устанавливался ниже уровня образца на величину нивелирного перепада, имитирующего внешнее гидравлическое сопротивление системы.

Основными рабочими элементами испарителя являлись:

электронагреватель, пористые испарительные элементы, выполненные в виде тонких горизонтальных пластин, и сменные плиты-датчики теплового потока с различной геометрией паростоводных каналов.

В качестве пористых испарительных элементов использовались образцы, изготовленные из минерально-волоконистых материалов (табл. I), толщиной δ , пористостью Π , проницаемостью K , максимальным капиллярным давлением $4\sigma_{\text{max}}$ и коэффициентом теплопроводности скелета $\lambda_{\text{ск}}$.

Таблица I.

Характеристики пористых образцов

№ обр.	Материал	$\delta \times 10^{-3}$ м	Π , %	$K \times 10^{-15}$ м ²	$4\sigma_{\text{max}} \times 10^{-5}$ Па	$\lambda_{\text{ск}}$, Вт/(м·К)
I	Стекло- волокно	0,2	58	0,31	0,4	0,74
2	Асбест	0,64	60	0,27	2,4	0,36
3	Каолин	1,2	46	1,42	0,8	3,46
4	Карбид кремния	6,0	62	40,5	0,52	14,3

Пористость определялась взвешиванием сухого и насыщенного водой образцов. Проницаемость — методом проливки жидкости. Максимальное капиллярное давление — методом вытеснения жидкости из пор.

Четыре плиты-датчика теплового потока диаметром 150 мм и толщиной 20 мм имели фрезерованные каналы для отвода пара, представляющие прямые параллельные каналки глубиной 2 мм, с различными шириной (a) и расстоянием между ними (b), табл. 2, что позволило в экспериментах изменять геометрические условия.

Таблица 2.

Геометрические размеры
плит-датчиков

№ ПЛИТЫ	a , мм	b , мм
I	I	2
2	2	I
3	2	4
4	5	5

Для измерения температуры использовались хромель-копелевые термомпары диаметром 0,2 мм. Термо-ЭДС регистрировалась микроампервольтметром Ф-30, класса точности 0,1. Тарирование термомпар осуществлялось в комплексе с измерительными приборами, что позволило обеспечить максимальную суммарную погрешность до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Тарирование плит-датчиков теплового потока осуществлялось на устройстве, в котором тепловой поток, проходящий через плиту-датчик, определялся по количеству сконденсированного пара, а разность температур в местах установки термомпар — по измеряемой термо-ЭДС.

Анализ погрешностей показал, что основные измеряемые в экспериментах величины: плотность теплового потока, расход теплоносителя, величина внешних тепловых потерь, капиллярно-гидравлические характеристики пористых элементов (максимальное капиллярное давление и проницаемость) определялись с ошибкой не более 10%.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования характеристик пористых испарительных элементов, дано сопоставление с результатами расчетов по предложенной модели, а также приведено сопоставление с расчетными и экспериментальными данными других авторов.

Целью экспериментального исследования являлась проверка принятой двумерной модели испарения и подтверждение расчетных соотношений для рабочих и предельных значений расхода и плотности тепловых потоков.

Эффект двумерности процесса исследовался путем учета влияния геометрических критериев на температурное состояние пористых образцов и характеристики процесса для различных пористых материалов и условий эксперимента. Экспериментальные данные приводились к безразмерному виду, что позволило обобщить полученные результаты и сравнить с результатами расчетов по полученным соотношениям.

Результаты экспериментального исследования осредненных по поверхности температур жидкостной и паровой поверхностей показали следующее. С ростом тепловой нагрузки или при увеличении внешнего гидравлического сопротивления системы температура жидкостной поверхности

повышалась, постепенно приближаясь к температуре насыщения вблизи предельной тепловой нагрузки. Температура паровой поверхности превышала температуру насыщения, что можно считать признаком заглужения фронта испарения внутри пористой структуры. Приближение температуры жидкостной поверхности образцов к температуре насыщения сопровождалось образованием пузырьков пара, что означало выход фронта испарения на жидкостную поверхность пористого образца. Соответствующее этому значение достижимой тепловой нагрузки считалось предельным, а измеренный расход – предельным расходом теплоносителя.

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что геометрические параметры существенно влияют на температурное состояние пористых испарительных элементов. На рис. 4 показано, что увеличение размера порицаемого

участка вызывает повышение температуры паровой поверхности в предельном режиме, поскольку предельная плотность теплового потока при этом существенно возрастает.

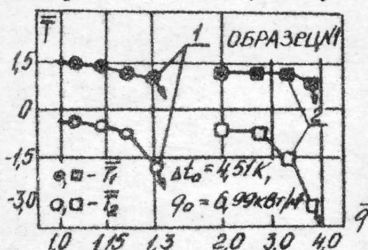
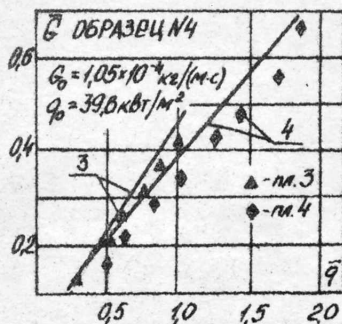


Рис. 4. Температурное состояние образца № I при увеличении тепловой нагрузки: 1- $q_0 = 7.5$; 2- $q_0 = 1/3$; 2- 7.5 ; 2/3



Экспериментально подтверждено, что геометрические параметры существенно влияют на величину расходов и тепловых нагрузок (рис. 5). Результаты расчетов (сплошные линии) и экспериментальные данные (условные знаки) хорошо сопоставимы.

Рис. 5. Характеристики испарения образца № 4: 3- $q_0 = 0.5$; 2- $q_0 = 1/3$; 4- 0.83 ; 1/2

С целью подтверждения расчетных соотношений, полученных в ходе численного исследования, экспериментальные значения расходов и тепловых нагрузок, а также их предельные значения сравнивались с расчетными. Экспериментальные данные получены для образцов из стекловолкна, асбеста, каолина и карбида кремния; теплоноситель - дистиллированная вода. Удовлетворительное согласование экспериментальных данных с расчетами подтвердило (со средней погрешностью 20%) справедливость полученных соотношений в заданном диапазоне изменения определяющих критериев.

Сопоставление результатов расчетов по методике, разработанной автором, с расчетами и экспериментальными данными других авторов показало:

1) значения предельных тепловых нагрузок получены до 30% ниже, чем при расчетах по одномерной модели С.К.Мариниченко. Наличие непроницаемого для пара участка поверхности пористого испарительного элемента затрудняет отвод пара, что ведет к снижению плотности предельного теплового потока.

2) значения предельных тепловых нагрузок хорошо сопоставимы с данными экспериментальных исследований С.К.Мариниченко и А.П.Галкина.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена физическая модель и составлено математическое описание (математическая модель) двумерного процесса испарения в пористых элементах, учитывающая неравномерное распределение по поверхности элемента потока теплоты и потока отводимого пара вследствие наличия непроницаемого для пара участка поверхности, контактирующего с нагревательным элементом.

2. Разработаны методика и программа расчета на ЭВМ, выполнено численное исследование двумерного процесса испарения при капиллярной подаче жидкости.

3. Результаты численного эксперимента, представленные в обобщенном безразмерном виде, позволяют рассчитывать рабочие и предельные значения тепловых потоков и расходы испаряемой жидкости, а также положение и форму поверхности фазового перехода исходя из капиллярных и теплофизических

характеристик пористых элементов и свойств теплоносителя, геометрии греющей поверхности и условий работы испарительной системы.

4. Справедливость двумерной модели испарения подтверждается удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных для рабочих и предельных значений расхода и плотности тепловых потоков.

5. Выполнено экспериментальное исследование, подтвердившее (со средней квадратичной погрешностью 20%) справедливость полученных расчетных соотношений в заданном диапазоне изменения определяющих критериев, получено удовлетворительное согласование расчетов с экспериментальными данными других авторов.

6. Двумерная модель испарения, учитывающая неравномерное по поверхности распределение потоков теплоты и теплоносителя, позволяет уточнить значение плотности предельных тепловых потоков, которые получены до 30% ниже, чем при расчете по одномерной модели.

7. Сформулированы рекомендации для выбора параметров пористой испарительной системы, обеспечивающие повышение предельной плотности тепловых потоков.

8. Результаты работы могут быть использованы при разработке пористых испарительных элементов теплообменников, систем термостатирования или испарительного охлаждения, испарителей тепловых труб.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Иванов М.И. Численное исследование двумерной модели испарения из пористой пластины // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тезисы доклада У Всесоюзной школы-семинара. - М., 1985. - С.31.

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

3. Хвостов В.И., Чукаев А.Г., Иванов М.И. Двумерная модель гидродинамики и теплообмена при однофазном пористом охлаждении // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 5. - С. 79-83.

4. Иванов М.И. Двумерная модель гидродинамики и теплообмена при испарении из капиллярно-пористой пластины // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 10. - С. 44-48.

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

6. Иванов М.И. Численное исследование испарения из капиллярно-пористой пластины в двумерной модели // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тезисы доклада УИ Всесоюзной школы-семинара. - М., 1987. - С. 14.

7. Хвостов В.И., Иванов М.И., Галкин А.П. Численное исследование двумерной модели испарения жидкости из капиллярно-пористой пластины // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № 12. - С. 60-63.

8. Галкин А.П., Иванов М.И., Хвостов В.И. Модели тепломассообмена при испарении жидкости из капиллярно-пористой структуры // Тепломассообмен. ММФ: Тезисы доклада Минского международного форума. - Минск, 1988. - С. 19-21.

Иванов

Тед. нес 28.4.89

Д-18426

Заказ № 617

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Ротапринт МВТУ

16

