

М383319

НА ДОГ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

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

---

На правах рукописи

МАРИНИЧЕНКО СВЕТЛАНА КОНСТАНТИНОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ИЗ ПОРИСТЫХ ПЛАСТИН  
ПРИ ПОДАЧЕ ЖИДКОСТИ КАПИЛЛЯРНЫМИ СИЛАМИ

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 - 1981

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

БРДЛИК П.М.

кандидат технических наук

ПОЛОНСКИЙ В.С.

Ведущая организация:

ВНИИ по эксплуатации атомных электрических станций

Защита диссертации состоится "14" декабря 8 1530  
на заседании специализированного совета К.053.15.05 при  
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и  
ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище  
имени Н.Э.Баумана по адресу:

107005, Москва

Ваши отзывы (в двух  
учреждениях, просим направить  
адресу.

С диссертацией и  
МВТУ им. Н.Э.Баумана

Автореферат ра:

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

М 3833/9

Актуальность работы. Развитие современной техники выдвигает на первый план задачу интенсификации процессов тепло-и массообмена. В этой связи особое внимание привлекает возможность организации процессов испарения жидкостей из пористых структур, обеспечивающая увеличение передаваемых тепловых нагрузок за счет развитой поверхности теплообмена и использования теплоты испарения.

17383319  
Частным случаем рассматриваемой проблемы является задача осуществления процесса испарения из пористой структуры в применении к элементу испарительного теплообменника, когда потоки тепла и массы имеют встречное направление, а подача жидкости к фронту испарения производится под действием капиллярных сил. Испарительный элемент, в котором движение жидкости осуществляется под действием капиллярного напора, развиваемого пористым слоем, способен работать без дополнительных затрат энергии на перемещение жидкости, особенно - в условиях ослабленной или нулевой силы тяжести. При этом обеспечивается надежный подвод жидкости к обогреваемой поверхности и эффективное разделение фаз.

Цель работы заключается в получении расчетных зависимостей и разработке инженерной методики расчета рабочих и предельных характеристик устойчивого испарительного процесса. Основная научная задача, решение которой необходимо для достижения поставленной цели, заключается в разработке физической и математической моделей процесса испарения, включая аналитическое и экспериментальное исследование влияния конструктивных и режимных факторов на границы устойчивости процесса.

Научная новизна. Впервые предложен способ аналитического учета действия капиллярных сил в процессе испарения из пористой структуры при встречном направлении потоков тепла и рабочего тела. Экспериментально установлено и аналитически обосновано наличие и положение границ устойчивого протекания процесса испарения из пористой пластины при подаче жидкости к фронту испарения капиллярными силами, предложено объяснение причин потери устойчивости процесса и получено аналитическое выражение для параметра устойчивости, позволяющего произвести оценку работоспособности испарительной системы пористая структура-жидкость. В соответствии с теоретической моделью, подтвержденной полученными экспериментальными данными, разработана методика расчета рабочих и

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1383319

Мариниченко С.К. Исследован

М В Т У  
им. Н.Э. Баумана  
БИБЛИОТЕКА

предельных характеристик (подводимый тепловой поток и расход рабочей жидкости) в различных условиях протекания процесса.

Практическая ценность. Результаты работы позволяют выполнять расчетную оценку работоспособности испарительных устройств с капиллярно-пористыми структурами на стадии их проектирования, а также сформулировать требования к свойствам капиллярно-пористых материалов, предназначенных для использования в испарительных устройствах.

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

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на межвузовском семинаре "Теплофизика" (Москва, 1979 г.); на всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980 г.); на II и III всесоюзных школах-семинарах "Газодинамика и теплообмен в энергетических установках" (Минск, 1979 г., Нарва, 1981 г.); на VI всесоюзной конференции по тепломассообмену (Минск, 1980 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 печатных работ и выпущено 3 научно-технических отчета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 132 наименований и включает 128 стр. машинописного текста, 80 рисунков, 8 таблиц, 1 приложение (справки о внедрении в практику результатов работы).

В первой главе дается анализ работ, опубликованных по исследуемой проблеме, и сформулирована задача исследования.

В опубликованных до настоящего времени теоретических и экспериментальных работах, касающихся испарения жидкостей в пористых структурах, процесс испарения рассматривался в основном с точки зрения использования его в целях тепловой защиты теплонапряженных элементов конструкций. Подача жидкости предполагалась принудительной, под действием заданного и постоянного перепада давлений, создаваемого некоторым посторонним источником, а величина капиллярного перепада давлений, развиваемого пористой структурой, считалась пренебрежимо малой по сравнению с ее гидравлическим сопротивлением. В условиях, когда потоки тепла и рабочего тела направлены навстречу друг другу, реализация испарительного

охлаждения оказалась затруднительной вследствие возникающей при этом неустойчивости процесса, являющейся одним из основных факторов, препятствующих широкому применению пористых структур в системах тепловой защиты и теплообменниках различных типов. Причиной неустойчивости является резкое изменение собственного гидравлического сопротивления пористой структуры при изменении положения фронта испарения внутри нее, что сопровождается неконтролируемым выходом фронта за пределы структуры.

При использовании пористых структур в качестве испарительных элементов теплообменной аппаратуры основную роль в балансе движущих сил играют силы капиллярного впитывания. В описанных в литературе исследованиях, в том числе и в существующих моделях устойчивости, действие капиллярных сил либо не учитывалось вообще, либо оценивалось лишь качественно, причем иногда, как показано в данной работе, — неверно.

Задачей настоящего исследования являлось решение проблемы устойчивости применительно к пористым испарительным теплообменникам. Рассматривается случай, когда подача жидкости к фронту испарения осуществляется под действием капиллярных сил, величина которых определяется структурой пористого элемента, физическими свойствами жидкости и термодинамическими условиями в зоне расположения менисков.

Во второй главе на основе анализа упрощенной физической мо-

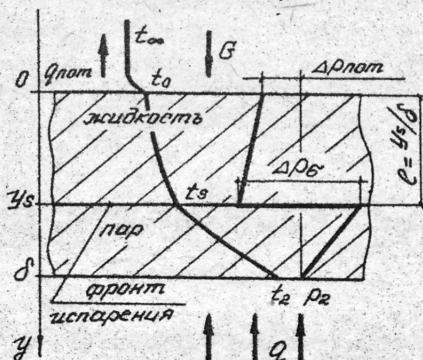


Рис. I. Физическая модель процесса.

дели, сохраняющей, однако, наиболее существенные стороны явления, рис. I, показано, что при использовании в качестве движущего напора сил капиллярного давления, возникающих на менисках жидкости в толще пористого материала, при определенных условиях возможно получение устойчивых режимов испарения. Эта возможность обусловлена наличием в пористой структуре краевого слоя, в котором происходит изменение радиуса

кривизны мениска от минимального значения, соответствующего радиусу поры, до бесконечно большого при выходе фронта на поверхность пластины. Максимальный (располагаемый) капиллярный перепад давлений достигается при расположении менисков в толще слоя на некотором расстоянии от его поверхности. Предлагается способ математического описания указанного явления.

Тепловая часть задачи построена и решается аналогично [8]. В результате решения получено распределение температур и давлений на жидкостном и паровом участках пластины. Определено положение фронта испарения в зависимости от величины подводимой тепловой нагрузки и расхода рабочей жидкости. Получены тепловая характеристика процесса – зависимость плотности теплового потока на обогреваемой поверхности пластины от расхода жидкости и координаты фронта испарения:

$$q = [G(\tau'' - \tau_\infty) + q_{\text{ном}}] \exp \frac{G C_p'' \delta (1 - \epsilon)}{\lambda_2} \quad (1)$$

и внутренняя гидродинамическая характеристика системы – зависимость гидравлического сопротивления пластины (при постоянном тепловом потоке) от расхода жидкости и положения фронта испарения:

$$\Delta p_c = G \frac{q}{K} \nu' + \frac{\nu'' \lambda_2}{C_p'' K} \left(1 - \frac{\nu'}{\nu''}\right) \ln \frac{q}{G(\tau'' - \tau_\infty) + q_{\text{ном}}} \quad (2)$$

Анализ устойчивости проводится путем сопоставления внутренней гидродинамической характеристики (2) и внешней – зависимости движущего перепада давлений от расхода жидкости и положения фронта испарения

$$\Delta p_{g\delta} = f(G, \epsilon). \quad (3)$$

Условие устойчивости рассматривается в виде соотношений

$$\Delta p_c = \Delta p_{g\delta} \quad (4)$$

\*И. Васильев Л.Л., Майоров В.А. Аналитическое исследование устойчивости равновесной системы двухфазного пористого охлаждения. – В кн.: Проблема тепло- и массопереноса. Минск, 1976, с. 219 – 231.



лагаемого параметра устойчивости:

$$K = \frac{\frac{G^2 V'}{K} \left[ \frac{t'' - t_{\infty}}{G(t'' - t_{\infty}) + q_{\text{пот}}} \left( \frac{V'' - V'}{V'} \right) - \frac{c_p'' \delta n}{\lambda_2} \right]}{\frac{\Delta p_6^{\text{max}}}{\delta n} \left[ \frac{G(t'' - t_{\infty})}{G(t'' - t_{\infty}) + q_{\text{пот}}} + \epsilon n \frac{q}{G(t'' - t_{\infty}) + q_{\text{пот}}} \right]} \quad (7)$$

Условие  $K \leq 1$  позволяет найти предельное значение тепловой нагрузки, до которого данная система сохраняет возможность устойчивой работы:

$$q_{\text{пр}} = [G_{\text{пр}}(t'' - t_{\infty}) + q_{\text{пот}}] \exp \frac{G_{\text{пр}} c_p'' \delta n}{\lambda_2}, \quad (8)$$

где

$$G_{\text{пр}} = \frac{(\Delta p_6^{\text{max}} - \Delta p_{\text{пот}}) K}{\delta [V'(1 - n) + V'' n]} \quad (9)$$

К факторам, наиболее сильно влияющим на предельные (из условий устойчивости) характеристики процесса, относятся толщина краевого слоя, величина гидравлических потерь во внешней по отношению к пористой пластине части системы, теплофизические свойства материала скелета и рабочей жидкости, геометрические характеристики пористой структуры.

Показано, что наличие краевого слоя даже незначительной толщины приводит к резкому уменьшению предельной тепловой нагрузки по сравнению с той, которая могла бы быть обеспечена, если бы максимальное значение капиллярного перепада давлений развивалось при нахождении фронта испарения непосредственно на обогреваемой поверхности.

Для рассматриваемых в работе систем пористая структура-жидкость (минераловолокнистые материалы-дистиллированная вода) влияние экспоненты в уравнении (8) на величину предельной нагрузки пренебрежимо мало (линии  $q = \text{const}$  почти совпадают с линиями  $G = \text{const}$ ) и тепловая нагрузка практически прямо пропорциональна расходу жидкости. При этом оказывается, что величина предельного теплового потока при данном значении толщины краевого слоя фактически прямо пропорциональна движущему перепаду давлений, равному разности между располагаемым (капиллярным)

перепадом и гидравлическим сопротивлением внешней части парожидкостного тракта. В работе исследовано влияние возможных тепловых потерь с жидкостной поверхности пористой пластины в окружающую среду. Показано, что при небольших тепловых потоках ( $10^3$ – $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>), характерных для испарительных теплообменников, максимальная полезная тепловая нагрузка, соответствующая паропроизводительности пластины, не зависит от величины тепловых потерь.

По предложенным в работе зависимостям рассчитаны предельные характеристики процесса испарения различных жидкостей (вода, метиловый спирт, глицерин, фреон-II). Наибольшие тепловые потоки, допустимые из условий устойчивости, могут быть сняты при использовании воды. Анализ влияния давления в системе на положение границы устойчивости показал, что в диапазоне давлений  $10^4$  –  $5 \cdot 10^5$  Па, представляющем наибольший интерес для использования капиллярно-пористых структур, величина предельного теплового потока меняется мало.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки методики проведения и обработки эксперимента.

Экспериментальные исследования процесса испарения из пористых пластин при капиллярной подаче жидкости к фронту испарения проводились в МВТУ им. Н.Э.Баумана на специально сконструированной и изготовленной установке, включавшей в себя рабочий участок (испарительный узел), системы подачи жидкости и конденсации пара и контрольно-измерительный стенд. Испарительный узел имел жидкостную и паровую полости (емкостью соответственно 1 и 0,8 л), разделенные исследуемым образцом диаметром в свету 147 мм, установленным в горизонтальной плоскости. Со стороны паровой полости к образцу была прижата плита электронагревателя с системой каналов для отвода пара. Плита являлась датчиком теплового потока. Между ее рабочей поверхностью и пористой пластиной устанавливалась латунная сетка (12 ячеек на сантиметр, толщина 0,46 мм, диаметр проволоки 0,2 мм), которая предохраняла поверхность образца от механических повреждений и служила для более равномерного распределения подводимого теплового потока и отводимого от пластины потока пара. Питаящая жидкость подводилась в жидкостную полость из расходной емкости, укрепленной на штативе, что позволяло создавать переменный нивелирный перепад  $H$  между поверхностью пористой пластины и свободным уровнем жидкости в емкости, имити-

ровавший возможные гидравлические потери во внешней (по отношению к пластине) части системы в диапазоне  $\pm 1$  м.

Для измерения температуры на жидкостной и паровой (обогреваемой) поверхностях капиллярно-пористой композиции, а также в различных точках рабочего участка размещались 23 хромель-копелевые термопары из провода диаметром 0,2 мм. ЭДС которых измерялась электронным цифровым микровольтамперометром Ф-30 класса точности 0,1. Средняя температура паровой поверхности измерялась термометром сопротивления из медного провода ПЭВ диаметром 0,03 мм (сопротивление 148 Ом при температуре 293 К), равномерно уложенного между пластиной и сеткой. Термопары и термометр сопротивления подвергались градуировке в комплекте с коммутирующей и измерительной аппаратурой, что обеспечивало суммарную максимальную погрешность в измерении температур не более  $\pm 0,5$  К.

В качестве исследуемых образцов (табл. I) использовались капиллярно-пористые композиции из одного или нескольких слоев стеклоткани, асбестового или каолинового картона в разных сочетаниях (толщина пакета 0,48 - 3,5 мм), расположенных между латунной сеткой и пористыми металлокерамическими пластинами. Пластины обеспечивали равномерное прижатие композиции к плите-датчику. Ввиду того, что теплопроводность и проницаемость металлокерамических пластин были соответственно на 1-3 и на 2-4 порядка выше, чем эти же характеристики исследуемых образцов, наличие металлокерамики в композиции не оказывало заметного влияния на ход процесса.

Таблица I. Характеристики образцов и диапазон исследованных режимов.

| № образца | Материал пластины | $\delta$   | $K$                    | $d$   | $\lambda_{ск}$ | $Ar_{б}^{max}$ | $q_{пл}^{по}$     | $H$         |
|-----------|-------------------|------------|------------------------|-------|----------------|----------------|-------------------|-------------|
|           |                   | мм         |                        |       |                | $10^{-5}$      | $10^{-4}$         |             |
|           |                   | мм         | м <sup>2</sup>         | мм    | Вт/м.К         | Па             | Вт/м <sup>2</sup> | м           |
| 1         | асбестовый картон | 1,0<br>60  | $0,12 \cdot 10^{-15}$  | 1-2   | 0,363          | 3,5            | 0,58              | 0,02        |
| 2         | асбестовый картон | 1,3<br>60  | $0,175 \cdot 10^{-15}$ | 1-2   | 0,363          | 2,5            | 0,521             | 0,02 - 0,6  |
| 3         | каолиновый картон | 1,73<br>46 | $0,135 \cdot 10^{-14}$ | 0,5-1 | 3,46           | 0,6            | 0,606             | 0,02 - 0,9  |
| 4         | каолиновый картон | 3,46<br>46 | $0,11 \cdot 10^{-14}$  | 0,5-1 | 3,46           | 0,8            | 0,4               | 0,02 - 0,76 |
| 6         | стеклоткань       | 0,95<br>60 | $0,62 \cdot 10^{-14}$  | 8-10  | 0,74           | 0,056          | 0,495             | 0,02 - 0,56 |
| 8         | стеклоткань       | 0,48<br>60 | $0,62 \cdot 10^{-14}$  | 8-10  | 0,74           | 0,034          | 0,57              | 0,02 - 0,34 |

Обогреваемая поверхность образца во время опытов была обращена книзу, что способствовало удалению воздушных и паровых пузырей с ее жидкостной стороны и обеспечивало удобство визуального наблюдения через смотровое окно. После заполнения рабочего сосуда жидкостью и включения нагревателя достижение стационарного состояния фиксировалось по значениям температур в различных точках рабочего участка и по количеству конденсата. Длительность выхода на стационарный режим составляла 2,5–4 часа. Длительность рабочих режимов при постоянной нагрузке составляла не менее двух часов.

Коэффициент проницаемости и величина максимального капиллярного перепада давлений, развиваемого отдельными образцами, экспериментально измерялись на специально изготовленной обойме.

Анализ погрешностей показал, что точность определения итоговых величин составляла 10–15%.

В четвертой главе диссертации проводится анализ результатов экспериментального исследования и сопоставление полученных опытных данных с расчетными. На основе этого анализа предлагается модель механизма потери устойчивости испарительного процесса и приближенная методика расчета рабочих и предельных характеристик (расход рабочей жидкости и тепловая нагрузка).

Температурное поле в системе на стационарном режиме, достаточно удаленном от предельной нагрузки, характеризовалось тем, что температура на паровой поверхности образца практически равнялась температуре насыщения, а температура жидкости в объеме,

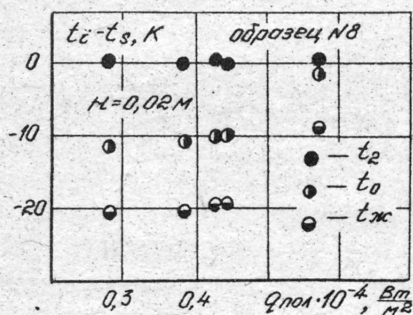


Рис. 3. Изменение температур в системе при росте тепловой нагрузки.

так же, как и температура замоченной (жидкостной) поверхности пластины, была заметно меньше температуры насыщения, рис. 3. При увеличении нагрузки сверх некоторого значения наблюдался быстрый и значительный рост температуры на паровой поверхности пластины, что сопровождалось появлением на жидкостной поверхности подвижных участков, покрытых мелкими паровыми (паровоздушными) пузырьками. При

увеличении подводимой нагрузки наблюдался рост и отрыв от поверхности сначала отдельных пузырей, а затем серий (струй) по всей плоскости пластины. При работе с отрицательным нивелирным перепадом это приводило к нарушению вакуума в жидкостной полости и перетеканию жидкости из испарительного узла в расходную емкость. Предельной считалась тепловая нагрузка, при которой начинался интенсивный рост температуры на паровой поверхности образца и появлялись первые участки, устойчиво покрытые пузырями пара.

По мере приближения нагрузки к предельному значению отмечалось небольшое превышение температуры паровой поверхности над температурой насыщения, что можно считать признаком отхода фронта испарения вглубь пластины. Величина недогрева до кипения в объеме жидкости и на поверхности образца при приближении к предельной нагрузке становилась близкой к нулю, что может объясняться интенсивным перемешиванием жидкости паровоздушными пузырями. Опыты показали, что температуры в различных точках на поверхностях пластины претерпевают беспорядочные пульсационные изменения во времени, причем амплитуда пульсаций и их частота возрастают по мере роста нагрузки. Увеличение нивелирного перепада приводило к закономерному уменьшению предельной тепловой нагрузки. Эксперименты подтвердили полученный из анализа модели вывод о том, что при уменьшении толщины пластины должна возрастать величина предельной тепловой нагрузки.

При обработке экспериментальных данных по значениям температур на поверхностях пористой композиции и значениям осредненного по поверхности пластины расхода и осредненного теплового потока рассчитывалось положение фронта испарения (1) и собственное гидравлическое сопротивление пластины (2). Полученные таким образом значения сопоставлялись с расчетной гидродинамической и тепловой характеристиками, построенными для различных значений толщины краевого слоя в пределах  $\lambda = 0 - 1$ . Такое сопоставление для пластины № 8 при  $\Delta H = -0,02$  м показано на рис. 4. Крайние правые точки на графике соответствуют значениям предельных тепловых нагрузок.

Наличие краевого слоя, т.е. то обстоятельство, что  $\Delta\rho_6^{max}$  развивается не на поверхности пластины, а в ее толще (пусть даже вблизи поверхности) резко снижает предельную тепловую нагрузку. Так, было получено, что теоретическая предельная нагрузка (при

$\lambda = 0$ ) пластины № 3 составила бы  $4,1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, при  $\lambda = 0,2$   $q_{пр} = 3,0 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, при  $\lambda = 0,8$   $0,8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> (линия I на рис. 4), а фактическая экспериментальная предельная нагрузка при  $\Delta H = -0,02$  м составляет  $0,606 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Значения  $\lambda$ , соответствующие экспериментальным величинам предельных тепловых нагрузок, составляют 0,8 – I от толщины пластины для всех исследованных образцов. Предположение о наличии краевого слоя следует из того, что  $q_{пр}^{экс} \ll q_{пр}^{\lambda=0}$ . Предлагаемая модель действия краевого слоя оправдывается тем, что расчет предсказывает именно такое резкое уменьшение предельной нагрузки даже при незначительных  $\lambda$ , рис. 5.

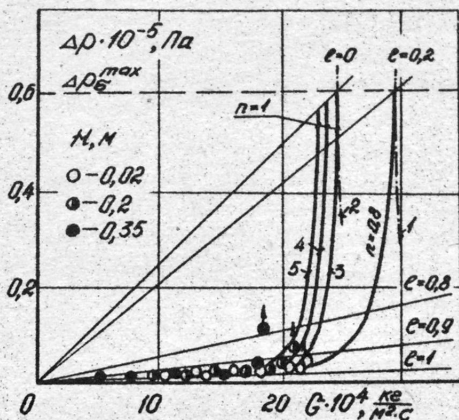
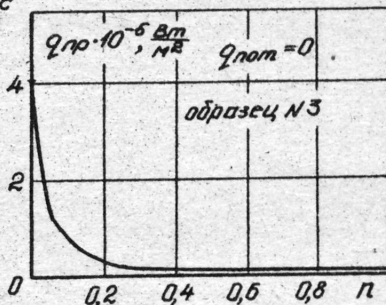


Рис. 4. Гидродинамические характеристики образца № 3. 1 –  $\rho g H = 0$ ,  $q = 0,8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $\rho g H = 0$ ,  $q = 0,6 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>; 3, 4, 5 –  $\rho g H = 0$ ;  $0,2 \cdot 10^4$  Па;  $0,35 \cdot 10^4$  Па.

Рис. 5. Зависимость предельной тепловой нагрузки от толщины краевого слоя.



Ограничение предельной нагрузки характеристикой  $\lambda \approx 1$  не означает, однако, что по всей поверхности пластины толщина краевого слоя почти равна полной ее толщине, т.е. что эффективный

диаметр пор на любом участке пластины монотонно уменьшается от паровой поверхности к жидкостной. Логично предположить, что толщина краевого слоя реальной пористой пластины на различных участках может иметь любое значение — от минимального, соответствующего нескольким диаметрам волокон, до максимального на "дефектных" участках, равного полной толщине пластины. В результате металлографического анализа, проведенного на металлокерамических пористых пластинах, использовавшихся в пористых композициях, на всех исследуемых образцах обнаружены участки с толщиной краевого слоя, приблизительно равной (или несколько меньшей) полной толщине пластины. Вероятность наличия на пластине дефектных участков возрастает при увеличении абсолютных размеров поверхности исследуемого образца. В работе исследованы образцы, у которых отношение диаметра пластины к ее толщине составляет 400 — 800. При последовательном увеличении тепловой нагрузки нарушение устойчивости происходит в первую очередь на участке с максимальной толщиной краевого слоя ( $L \approx I$ ). "Пробой" пластины паром на этом дефектном участке, который может занимать лишь малую долю поверхности образца, приводит к срыву вакуума в жидкостной полости и к потере работоспособности всей системы. Экспериментально измеренный при этом расход испаряемой жидкости (и соответствующая тепловая нагрузка) обеспечивается основной частью пластины, остающаяся практически замоченной, т.е. при  $\ell \approx I$ . Из рис. 4 видно, что вплоть до достижения предельного теплового потока испарение происходит в непосредственной близости от обогреваемой поверхности пластины ( $\ell \gtrsim 0.8$ ).

Измерение  $q_{пр}$  при  $H=var$  позволило экспериментально исследовать влияние внешних гидравлических сопротивлений на предельные характеристики процесса (расход жидкости и тепловая нагрузка). Сопоставление экспериментальных данных с расчетными показано ниже, рис. 6.

На основе проведенного комплексного исследования процесса испарения воды из тонких пористых пластин с малым коэффициентом теплопроводности была разработана приближенная методика расчета рабочих и предельных характеристик устойчивого процесса испарения жидкости из пористой пластины при подаче жидкости к фронту испарения капиллярными силами в условиях встречнонаправленных потоков тепла и массы.

Расчет по предлагаемой методике позволяет:

- 1) по имеющимся характеристикам пористых пластин (толщина, проницаемость, пористость, теплопроводность, развиваемое капиллярное давление) и параметрам внешней части системы (тепловые и гидравлические потери) определить паропроизводительность системы и снимаемые тепловые нагрузки;
- 2) из условий устойчивости найти предельные величины расхода рабочей жидкости и подводимого теплового потока.

Учитывая, что теплота перегрева пара в рассматриваемых случаях пренебрежимо мала по сравнению с подводимым тепловым потоком (расход почти пропорционален тепловой нагрузке) и то, что испарение происходит в непосредственной близости от обогреваемой поверхности, было принято, что температура обогреваемой поверхности равна температуре насыщения. Расход испаряемой жидкости в рабочей точке рассчитывается следующим образом:

$$G = \frac{q_{подб} - q_{плот}}{i'' - i_{\infty}} \quad (10)$$

Собственное гидравлическое сопротивление пористой пластины при данной тепловой нагрузке находится как

$$\Delta p_c = G \frac{\delta \nu'}{K} \quad (11)$$

Величина тепловых потерь через жидкостную полость должна быть задана, например, из предварительного расчета изоляции. Расчетное значение предельного по условиям устойчивости расхода испаряемой жидкости может быть получено из (9) в предположении, что  $\eta = 1$  и осредненный по поверхности расход равен удельному на дефектном участке. Предельная тепловая нагрузка рассчитывается по следующей зависимости:

$$q_{пр} = \frac{(\Delta p_c^{max} - \Delta p_{плот})(i'' - i_{\infty})K}{\delta \nu''} + q_{плот} \quad (12)$$

На рис. 6 представлено сопоставление опытных (точки) и расчетных (сплошные линии) значений предельной полезной тепловой нагрузки ( $q_{плот} = 0$ ) при изменении нивелирного перепада на различных пористых пластинах. Отклонение от расчетной зависимости не превышает 15 %, причем на пластинах с невысоким капиллярным

напором - стеклоткань - расхождения колеблется в пределах 3-7%.

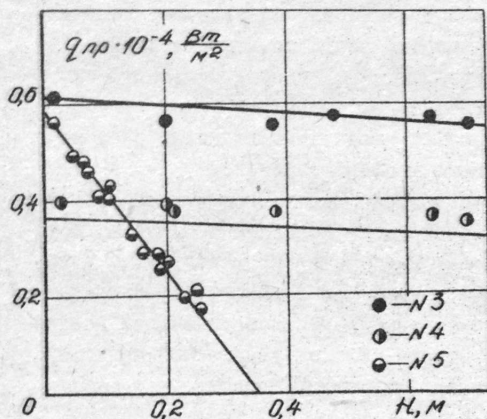


Рис.6. Зависимость предельной тепловой нагрузки от нивелирного перепада.

Удовлетворительное совпадение результатов подтверждает применимость разработанной модели устойчивого процесса испарения жидкости из тонких капиллярно-пористых пластин для расчета предельной тепловой нагрузки по предлагаемой методике.

В работе показано, что увеличить предельный тепловой поток можно, создав многослойный пористый пакет, в котором величина максималь-

ного капиллярного перепада давлений, развиваемого каждым отдельным слоем, увеличивается по известному закону в сторону замоченной поверхности. В этом случае, согласно предлагаемой модели устойчивости, фронт испарения последовательно, скачками переходит на горячую поверхность каждого следующего слоя. Аналитически установлено, что, используя пакет с определенными характеристиками слоев, можно ожидать существенного повышения предельной тепловой нагрузки и уменьшения темпа ее снижения при росте внешних потерь давления в системе по сравнению с однородной пластиной.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование процесса испарения из пористых пластин в условиях встречных потоков тепла и массы при подаче жидкости к фронту испарения капиллярными силами.
2. На основе рассмотрения упрощенной физической модели процесса разработана математическая модель, позволяющая описать внешнюю и внутреннюю гидродинамические и тепловые характеристики системы для случая, когда движущий перепад давлений создается капил-

лярными силами, возникающими в толще пористой структуры. Существенным и новым в этой модели является представление о связи капиллярного перепада давлений с положением фронта испарения, о наличии краевого слоя и о способе аналитического описания этих факторов.

3. На специально для этих целей изготовленной установке экспериментально подтверждены основные положения физической и математической моделей, измерены рабочие и предельные характеристики использованных испарительных элементов, получены экспериментальные данные, необходимые для инженерных расчетов рассматриваемого процесса испарения.

4. На основе теоретического анализа и экспериментальных данных сформулированы условия, необходимые для обеспечения гидродинамической и тепловой устойчивости процесса пористого испарения при подаче жидкости капиллярными силами. Предложено аналитическое выражение для параметра устойчивости, позволяющее рассчитать границы устойчивой работы системы и влияние на них: тепловой нагрузки; капиллярных, структурных и теплофизических свойств пластин; теплофизических свойств рабочего тела; абсолютного давления (температурного уровня процесса); гидравлических сопротивлений системы.

5. Установлено, что значение предельной тепловой нагрузки ограничивается локальным нарушением устойчивости на отдельных, не больших по площади участках пластины, в то время, как суммарная паропроизводительность испарительной системы соответствует расположению фронта испарения вблизи обогреваемой поверхности пластины.

6. Разработана инженерная методика расчета рабочих и предельных характеристик системы пористая структура-жидкость в условиях встречных потоков тепла и массы при подаче жидкости к фронту испарения под действием капиллярных сил, результаты расчета по которой удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

7. Расчетным путем показано, что применением многослойного пакета с заранее заданным распределением проницаемости и капиллярного давления по толщине может быть достигнуто повышение предельной тепловой нагрузки и получена желаемая форма внешней гидродинамической характеристики.

8. Результаты работы могут быть использованы при разработке ком-

пактных испарительных теплообменников с пористыми элементами, а также при создании систем испарительного охлаждения и устройств активной теплозащиты.

9. Представляется целесообразным в дальнейшем исследовать особенности процесса испарения различных жидкостей, свойства которых значительно отличаются от свойств воды, в широком диапазоне давлений и продолжить исследования в области поиска возможностей увеличения предельных характеристик испарительного процесса.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Хвостов В.И., Мариниченко С.К. Исследование характеристик процесса испарения в пористых мембранах. - В кн.: Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении.: Тез. докл. Всесоюзной конференции/ Моск. высшее технич. училище им. Н.Э.Баумана. - М.: МВТУ, 1980, с. 42.
2. Хвостов В.И., Мариниченко С.К. Исследование характеристик процесса испарения в капиллярнопористых мембранах при подаче жидкости под действием капиллярных сил. - В кн.: Теплообмен-УТ, т.УП. - Минск: ИТМО АН БССР, 1980, с. 52-55.
3. Хвостов В.И., Мариниченко С.К. Об устойчивости процесса испарения из пористой структуры при перемещении жидкости капиллярными силами. - ИФЖ, т.39, № 5, 1980, с. 870-876.
4. Хвостов В.И., Мариниченко С.К. Аналитическое исследование устойчивости испарения при подаче жидкости капиллярными силами. - Редколл. ж. Изв.вузов - Энергетика. Минск, 1980, 22 с., ил., библиогр. 12 назв. (Рукопись деп. в НИИЭинформэнергомаш 15 сент. 1980 г., № 78 - др.).
5. Мариниченко С.К., Хвостов В.И. Экспериментальное исследование процесса испарения воды из пористых пластин. - Редколл. ж. Изв.вузов - Энергетика. Минск, 1980, 22 с., ил., библиогр. 9 назв. (Рукопись деп. в НИИЭинформэнергомаш 15 сент. 1980 г., № 77 - др.).
6. Хвостов В.И., Мариниченко С.К. Экспериментальное исследование процессов испарения в капиллярно-пористых структурах. - Труды/ Московский лесотехн. инс-т, 1981, вып.119, с. 22 - 38.

типогр. МВТУ им. Н.Э.Баумана, тир.100, заказ 1383

Л-86676 подп. в печать 27.10.81, объем 1 п.л.