

ПРОЕКТ INTAS NO. 06-100024-9339
**“DEVELOPMENT AND CREATION OF HEAT PIPES ON A BASIS METAL-
FIBROUS CAPILLARY STRUCTURES WITH IMPROVED THERMOPHYSIC
CHARACTERISTICS FOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS OF THE
PERSPECTIVE SPACE VEHICLES”**

**Отчеты украинского участника проекта –
Института проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича Национальной академии наук Украины**

**Научный руководитель украинской части –
академик НАН Украины, профессор А.Г.Косторнов**

КИЕВ, 2007—2008

ПЕРВЫЙ КВАРТАЛ 2007 Г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
ВЫБОР ОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТО-ГРАДИЕНТНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ И ПОРИСТОСТИ	8
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ СТРУКТУРАМИ	12

ВВЕДЕНИЕ

Работы и исследования по тепловым трубам в Институте проблем материаловедения им. И.Н.Францевича Национальной академии наук Украины проводятся, начиная с 70-х годов прошлого столетия. Известно, что первые разработки тепловых труб (ТТ) появились в США (1966 г.), в связи с развитием космического приборостроения. Сложность эвакуации тепла, 90...95 % которого необходимо отводить при функционировании и охлаждении космической радио- и электронной аппаратуры, обусловили большой интерес инженеров-теплофизиков к тепловым трубам. Последние, как известно, обладают сверхвысокими теплопередающими характеристиками, что позволяет решать сложные задачи теплоотвода. При этом, за счёт использования ТТ, возможен либо отказ от систем жидкостного охлаждения (с соответствующей заменой на воздушное охлаждение), либо применение совершенно новых, нетрадиционных инженерно-конструкторских решений.

Как известно разработчикам и конструкторам тепловых труб, важнейшее значение при создании высокоэффективных ТТ, способных передавать (отводить) относительно большие тепловые потоки Q_{hp} при малых значениях термических сопротивлений R_{hp} , имеет конструкция капиллярной структуры (КС) ТТ. Капиллярная структура должна выполнять две важных функции ТТ: 1) гидродинамическую (транспорт рабочей жидкости-теплоносителя при различной ориентации ТТ в гравитационном поле); 2) теплофизическую (высокую интенсивность теплообмена в зонах нагрева и охлаждения ТТ). Как и во многих теплофизических приложениях, одновременное влияние гидродинамических и теплофизических факторов на суммарный процесс часто является противоположным, т.е., улучшение «гидродинамики» процессов приводит к ухудшению их «теплофизики».

Известно, что в первых конструкциях ТТ в качестве капиллярной структуры использовались слои металлических сеток. Обоснованием такого применения была доступность сетчатых материалов, так как они серийно производятся

промышленностью. Однако сетчатые материалы, как показал опыт их использования в тепловых трубах в качестве капиллярных структур, имеют неудовлетворительные теплофизические и эксплуатационные характеристики. В частности, характерное для сетчатых материалов неудовлетворительное распределение пор по размерам приводит к срыву устойчивости процессов испарения и кипения в зонах нагрева ТТ, а также накладывает существенные ограничения на величины отводимых ТТ тепловых потоков. Кроме того, сетчатые материалы при изготовлении ТТ обычно укладываются в несколько слоёв, что приводит к образованию локальных относительно больших термических сопротивлений теплоотдачи, в том числе – контактных термических сопротивлений.

Лучшие результаты, по сравнению с сетчатыми КС, обеспечивают металлические порошковые капиллярные структуры (МПКС). В отличие от сетчатых ТТ, МПКС обладают распределением пор по размерам, обеспечивающим устойчивое кипение в зоне нагрева. Однако и МПКС имеют ряд недостатков. К таковым, в частности, относятся: 1) наличие относительно большого количества закрытых (тупиковых) пор; 2) небольшая высота капиллярного поднятия жидкости; 3) ухудшение проницаемости КС за счёт повышенного гидравлического сопротивления, обусловленного особенностями строения металлических порошковых структур. Первый отмеченный недостаток ТТ с МПКС приводит к так называемому «тепловому гистерезису», возникающему при увеличении и уменьшении значений подводимых к ТТ тепловых потоков. При гистерезисе значения характерных температурных напоров $\Delta T = T_{\text{стенки}} - T_{\text{жидкости}}$ - неодинаковы, что нежелательно для обеспечения нормальных условий термостабилизации охлаждаемых элементов. Второй и третий недостатки ухудшают эксплуатационные возможности тепловых труб.

Металлические волоконные капиллярные структуры (МВКС), технология изготовления и основные физические характеристики которых разработаны и, в основном, исследованы в Институте проблем материаловедения им. И.Н.Францевича Национальной академии наук Украины под руководством академика А.Г.Косторнова, практически лишены отмеченных выше недостатков. Благодаря особенностям

строения, в МВКС отсутствуют тупиковые поры, что исключает нежелательный тепловой гистерезис. МВКС обеспечивают высокие гидродинамические характеристики (хорошую проницаемость, относительно большую высоту капиллярного поднятия рабочей жидкости), также – высокие теплофизические характеристики (возможность функционирования ТТ в режимах устойчивого кипения рабочих жидкостей в зонах нагрева, высокую (за счёт кипения) интенсивность теплообмена, высокие предельные значения (по теплоотводу) критических тепловых потоков. МВКС обладают хорошими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Технология изготовления МВКС обеспечивает стабильные и воспроизводимые параметры, большой ресурс работы, высокую надёжность функционирования, возможность пластической деформации при конструктивной необходимости. Последнее отличие ТТ с МВКС является важным фактором для практического использования ТТ в реальных системах и конструктивах современной аппаратуры.

Основные характеристики разработанных в ИПМ НАН Украины ТТ и МВКС следующие:

- 1) материалы МВКС – медь, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, нихром;
- 2) материалы корпусов ТТ – медь, нержавеющая сталь;
- 3) пористость МВКС – 10...97 %;
- 4) толщина МВКС – 0,2...10 мм;
- 5) длина МВКС – до 4 м;
- 6) диаметр исходных металлических волокон – 20...80 мкм;
- 7) длина волокон – 2...10 мм;
- 8) средний (эффективный) диаметр пор – 10...250 мкм;
- 9) максимальный диаметр пор – 20...500 мкм.

Изготовление МВКС осуществляется методами волокнутой металлургии по технологии, разработанной в ИПМ. Основные технологические операции при изготовлении ТТ с МВКС следующие:

- 1) изготовление корпусов и деталей для заготовок ТТ;
- 2) получение монодисперсных волокон резкой жгутов из металлической проволоки;
- 3) гравитационное осаждение волокон;
- 4) спекание металлического войлока при заданных температурно-временных режимах;
- 5) прокатка листов войлока до требуемой толщины и пористости;
- 6) введение заготовок МВКС внутрь корпусов ТТ;
- 7) припекание МВКС к корпусам ТТ;
- 8) вакуумная откачка изготовленных заготовок ТТ;
- 9) заправка заготовки ТТ необходимым количеством рабочей жидкости;
- 10) герметизация ТТ;
- 11) контроль работоспособности изготовленных ТТ.

Основные направления исследований ИПМ Нан Украины в области разработок тепловых труб и капиллярно-пористых структур для ТТ следующие:

- 1) исследования параметров порового пространства новых типов капиллярных структур, получаемых на основе волоконных и композиционных материалов;
- 2) исследования гидродинамических характеристик слоистых и градиентных капиллярных структур;
- 3) исследования теплофизических характеристик капиллярных структур различных типов, получаемых из волокон и композиций на их основе;
- 4) исследования теплофизических процессов на металлических поверхностях с нанесёнными на них капиллярными структурами новых типов.

К таким исследованиям относятся: изучение процессов кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в зависимости от их структурно-гидродинамических характеристик; исследование влияния этих характеристик на контактное термическое сопротивление между пористым и сплошным слоями;

исследование теплообмена при конденсации рабочих жидкостей на пористых поверхностях.

В последнее время в Институте проблем материаловедения НАН Украины проводятся работы по исследованию влияния микрогравитации на параметры и характеристики тепловых труб, предназначенных для использования в системах космической техники. Известно, что снижение уровня гравитации может оказывать влияние на интенсивность процессов кипения.

ВЫБОР ОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТО-ГРАДИЕНТНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ И ПОРИСТОСТИ

На протяжении более 30 лет в Институте проблем материаловедения Национальной академии наук Украины проводятся научные исследования по созданию высокоэффективных капиллярных структур (КС) и тепловых труб (ТТ) на их основе. Результаты исследований обобщены в 5 монографиях, отражены в 80 научных публикациях и 60 патентах.

На базе полученных результатов создан ряд эффективных теплопередающих устройств испарительно-конденсационного типа. К ним можно отнести:

- агрегаты охлаждения теплонапряженных блоков космических аппаратов;
- системы охлаждения мощных клинотронов;
- прецизионные термостаты на основе коаксиальных ТТ;
- стенды для электротермотренировки мощных транзисторов;
- устройства для локального замораживания медицинского назначения и др.

Проведены комплексные испытания разработанных теплопередающих устройств в условиях жёстких механических и тепловых воздействий (вибрация, удары, линейные ускорения, термостарение, термоциклирование), длительные и ускоренные ресурсные испытания ТТ. Установлено, что такие ТТ могут работать при любой ориентации в пространстве, допускают изгиб по сложному профилю без ухудшения теплофизических параметров.

В традиционных пористых материалах (порошковых, волоконных, сетчатых) имеет место жёсткая корреляция зависимости практически всех свойств от

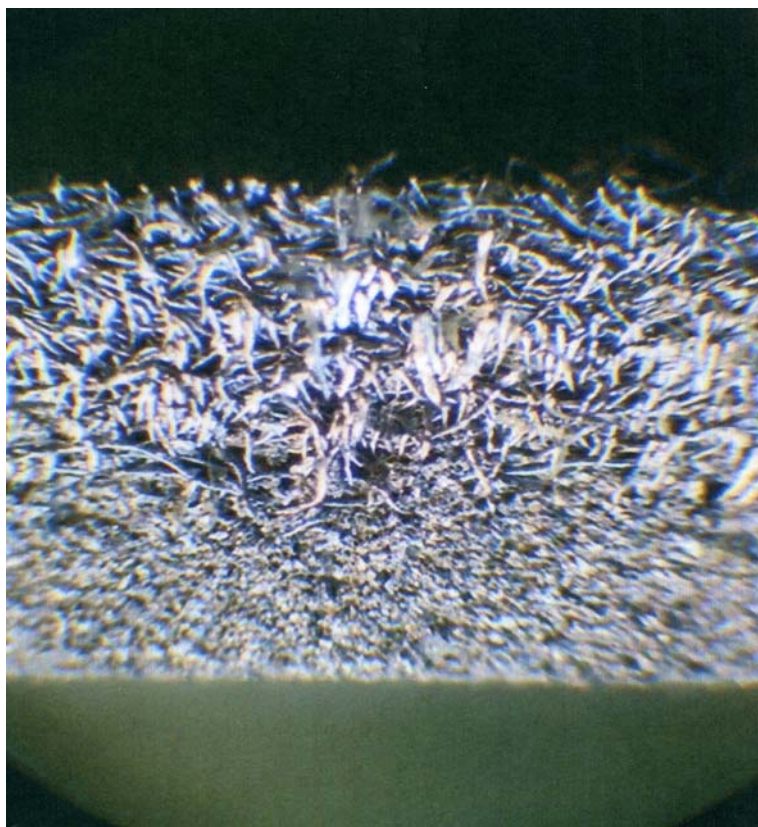
пористости. Сочетание в одном материале структурных элементов с разными геометрическими размерами и, следовательно, разной плотностью упаковки, позволяет устранить такую зависимость.

В данном проекте при разработке КС будут использованы новые слоистые материалы, содержащие как линейные (волокна) так и точечные (порошок) структурные элементы.

В таких материалах реализуются различные механизмы уплотнения: чисто контактный характер уплотнения порошков при облегчённом перемещении частиц путём взаимного скольжения и гибко-жесткий характер уплотнения волокон, когда имеет место не только контактная, но и обратимая упругая и необратимая пластическая деформация. Поэтому, в зависимости от соотношения размеров порошковых и волоконных частиц, толщин волоконных и порошковых слоёв, диапазон изменения структурных характеристик таких материалов существенно расширяется.

В I квартале 2007 года исследован процесс гравитационного формования высокопористых композиционных материалов металлических порошков и волокон. Листовые образцы материалов получали послойным осаждением при наложении вибрации волокон из нержавеющей стали диаметром 30...100 мкм и порошка нержавеющей стали с размером частиц 0,04...0,3 мм.

Проведенные исследования показали, что в зависимости от соотношения размеров порошковых (d_n) и волоконных (d_b) частиц, а также толщин волоконных и порошковых слоёв формируются различные типы макроструктуры материалов. Структуры из отдельных волоконных и порошковых слоёв формируются при соотношении $d_n/d_b > 2$ (рис. 1.1.1). При значениях $d_n/d_b < 2$ порошок частично или полностью осаждаётся в предварительно сформованный высокопористый волоконный каркас. Такие композиции наиболее перспективны с точки зрения использования их в качестве КС к ТТ (рис.1.1.2).



- СЛОЙ ВОЛОКОН

- СЛОЙ ПОРОШКА

Рисунок 1.1.1 – Слоистая пористая волокнуно - порошковая композиция

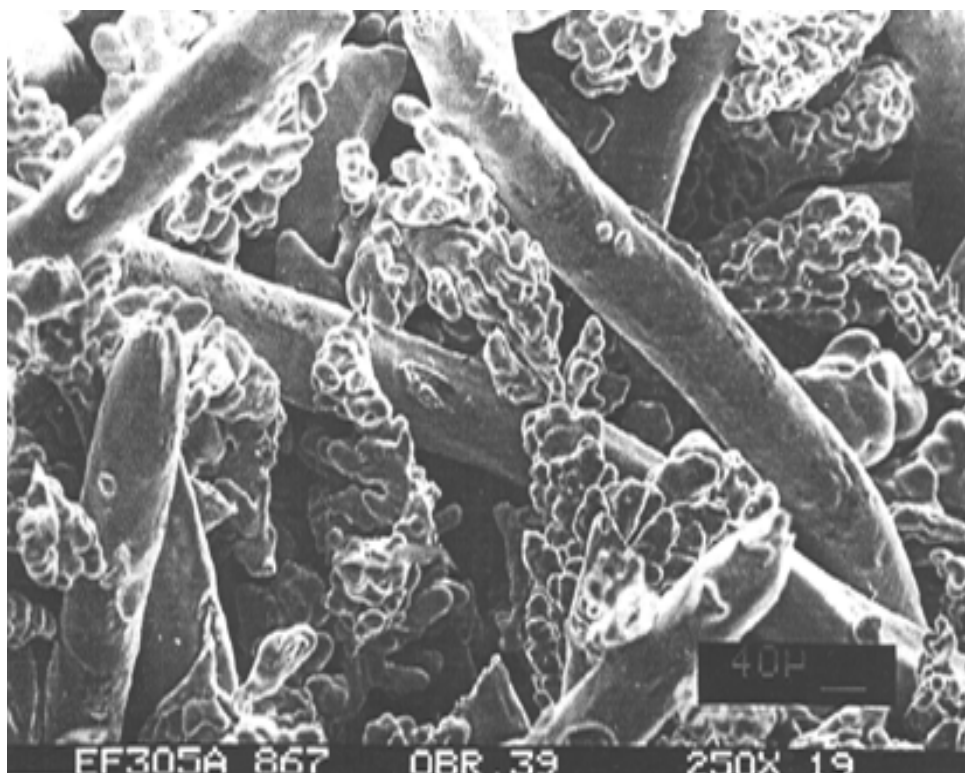


Рисунок 1.1.2 – Топограмма пористой каркасной волокнуно – порошковой композиции

Изготовлено три типа слоистых КС:

- чисто волокновые КС, содержащие слой из волокон диаметром 50 мкм, толщиной 0,75 мм и слой из волокон диаметром 30 мкм, толщиной 0,25 мм;

- волокново-порошковые КС в виде каркасов из волокон диаметром 50 мкм, толщиной 1 мм, заполненных с одной стороны на глубину 0,25 мм порошком с размером частиц 60 мкм;

- волокново-порошковые КС, представляющие собой волокновые каркасы из волокон диаметром 30 мкм, толщиной 1 мм, заполненные с одной стороны на глубину 0,25 мм порошком с размером частиц 40 мкм.

Характеристики изготовленных в I квартале 2007 года опытных КС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики опытной партии КС из металлических волокон и порошков

№ обр	Масса, г	Толщина мм	Ширина мм	Длина мм	Средняя пористость, %	Состав материала
1	35	1,0	50	300	70,2	Слой волокон Ø50 мкм, толщиной 0,75 мм и слой волокон Ø30 мкм, толщиной 0,25 мм
2	24	1,0	50	300	80,4	
3	10	1,0	50	300	91,5	
4	36	1,0	50	300	69,3	Слой волокон Ø50 мкм, толщиной 1,0 мм, заполненный с одной стороны на глубину 0,25 мм порошком 60 мкм
5	28	1,0	50	300	76,2	
6	20	1,0	50	300	82,0	
7	34	1,1	50	300	70,0	Слой волокон Ø50 мкм, толщиной 1,0 мм, заполненный с одной стороны на глубину 0,25 мм порошком 40 мкм
8	28	1,0	50	300	76,0	
9	20	1,0	50	300	82,0	

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ СТРУКТУРАМИ

Исходя из физических представлений и подходов к пониманию процессов кипения нами предложена следующая приближенная физическая модель теплообмена при кипении на поверхностях, покрытых капиллярно-пористыми структурами. В основу модели положены следующие допущения: 1) реальная пористая структура (рис. 1.2.1,а) заменяется идеализированной; последняя состоит из ряда непрерывно функционирующих парогенерирующих пор правильной геометрической формы и порового пространства (жидкостных пор), целиком заполненного жидкостью (рис. 1.2.1,б); 2) диаметр паровых пор изменяется от D_{\max} в начале закипания жидкости (рис. 1.2.2,а) до D_{\min} ; при этом отношение суммарной площади сечения пор, которые генерируют пар, F_v , к площади поверхности нагрева F , обозначенное ε , изменяется от 0 до ε_{\max} (рис. 1.2.2,с); 3) теплота от поверхности нагревания передается тремя путями: за счет эффективной теплопроводности КПС и конвекции жидкости (q'_1); за счет микрооребрения поверхности нагрева - через микропенку жидкости на стенках паровых пор (q''_1); за счет испарения микрослоя жидкости в основаниях паровых пор (q_2) (рис. 1.2.3,б); 4) теплопроводность капиллярно-пористой структуры и жидкости в пространстве КПС, не занятом паровыми порами, заменяется интегральной теплопроводностью λ_{ef} ; 5) на стенках паровых пор существует микропенка жидкости, толщина которой δ_f - неизменна по стенкам поры; 6) в основаниях паровых пор существует микрослой жидкости δ_{ll} , толщина которого - постоянна по сечению поры.

В соответствии с предложенной приближенной моделью существует суммарное (переменное, в зависимости от физических характеристик КПС) термическое сопротивление отводу теплоты R_{CS} при кипении на поверхности, покрытой КПС, которое состоит из суммы трех термических сопротивлений R'_1 , R''_1 , R_2 , соответствующих рассмотренным выше долям плотности теплового потока.

Суммарная плотность теплового потока при кипении жидкости на поверхности, покрытой КПС, в условиях свободного движения жидкости, может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$q = q'_1 + q''_1 + q_2 = \frac{\Delta T}{R_1} \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{\Delta T - \Delta T^*}{R_1} \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{\Delta T - \Delta T^*}{R_2} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Термическое сопротивление теплоотдачи R'_1 (за счет конвекции и эффективной теплопроводности порового пространства КПС, занятого жидкостью) можно определить из зависимости: $R_1^1 = R_{\text{конт}} + \frac{\delta_{\text{КС}}}{\lambda_{\text{эф}}} + \frac{\delta_{\text{ПС}} - \delta_{\text{КС}}}{\lambda_{\text{ж}}}$, где $R_{\text{конт}}$ - термическое сопротивление контакта поверхности нагрева капиллярно-пористой структуры; δ_{bl} - толщина пограничного слоя; $\delta_{\text{КС}}$ - толщина пористой структуры. Величина $R_{\text{конт}}$ зависит от качества соединения КПС с поверхностью.

Толщину теплового пограничного слоя δ_{bl} для поверхности с КПС, (предположив, что ее величина - такая же, как и на гладкой поверхности), можно определить по известным зависимостям для расчета теплообмена в условиях свободной конвекции жидкости.

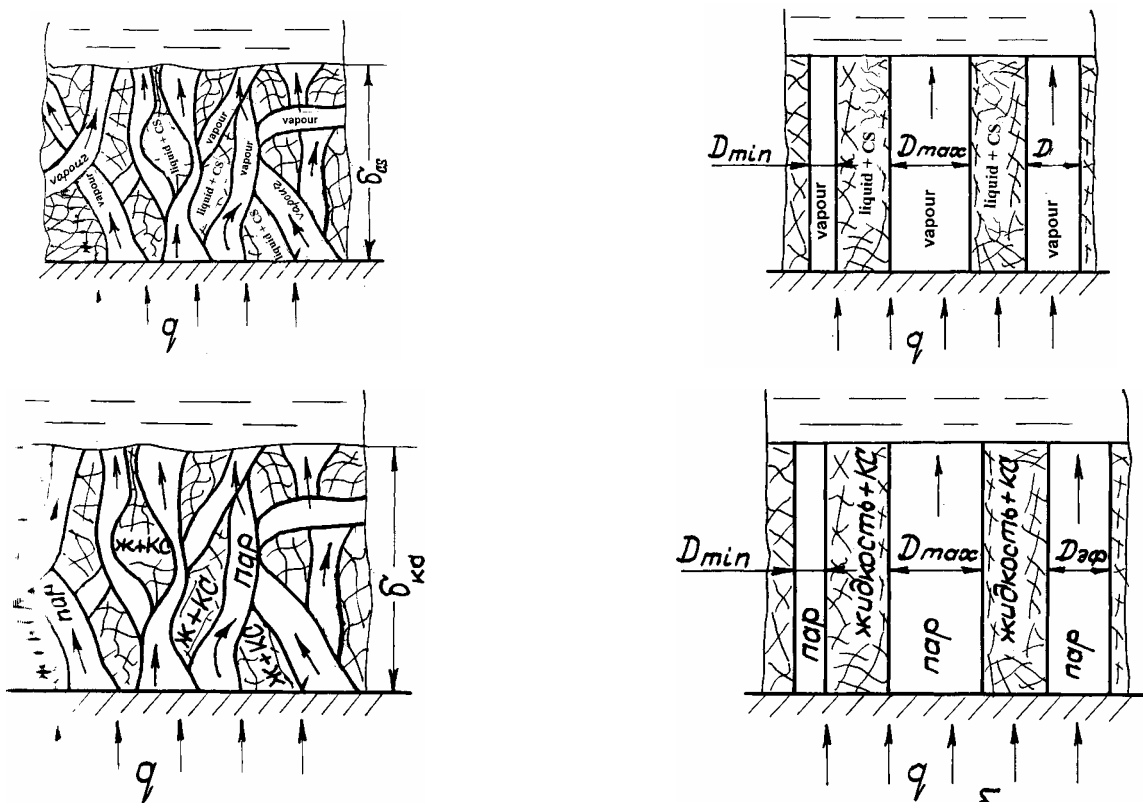


Рисунок 1.2.1- Схема процесса парообразования и теплообмена на поверхности, покрытой капиллярно-пористой структурой, в условиях свободного движения жидкости^ *a* - реальные условия контактного теплообмена; *b* - идеализированные условия приближенной физической модели

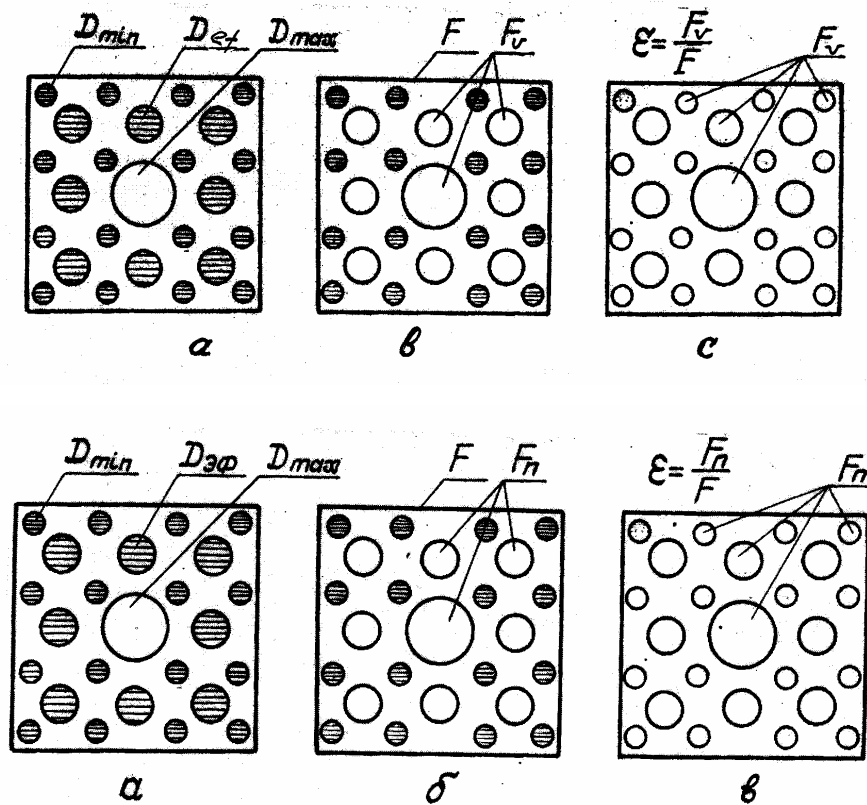


Рисунок 1.2.2 - Изменение площади парогенерирующих пор КПС в зависимости от плотности теплового потока: *a* - малые величины q ; *b* – повышенные значения q ; *c* - предельные величины q ; заштрихованные поры заполнены однофазной жидкостью; не заштрихованные - с паровой фазой

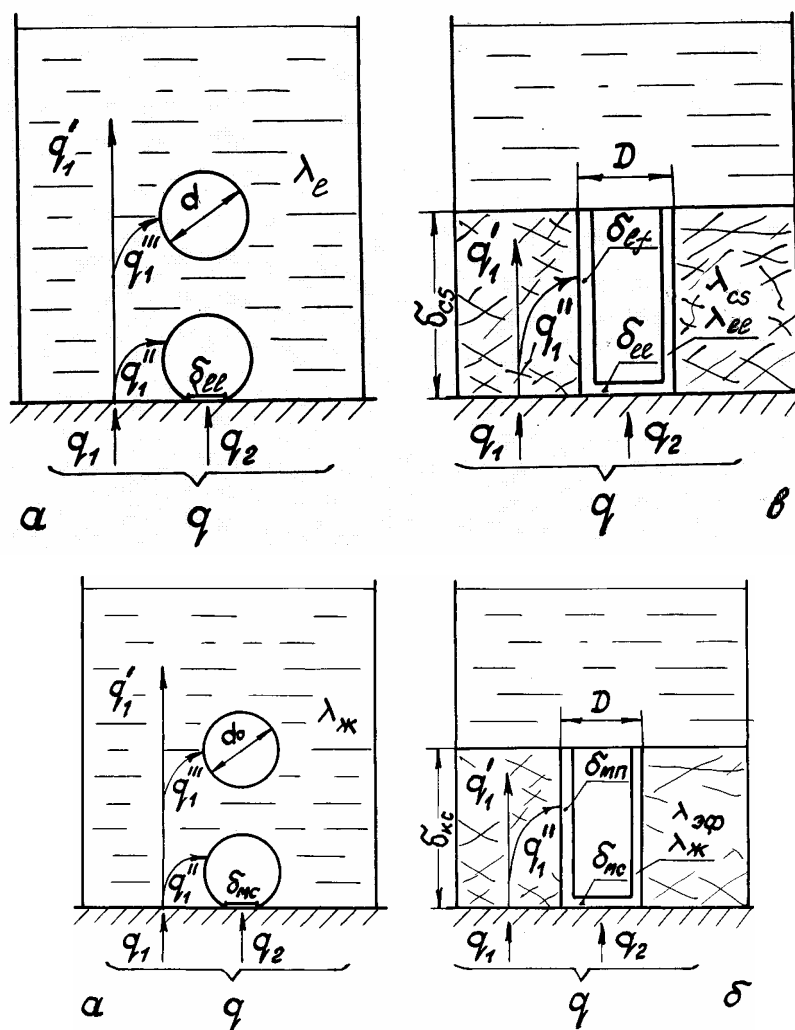


Рисунок 1.2.3 - Схема теплообмена при кипении на гладкой технической поверхности (а) и на поверхности, покрытой пористой структурой (б): q_1 – часть общей плотности теплового потока, отводимого от греющей поверхности жидкой фазой; q_2 – часть общей плотности теплового потока, отводимого от греющей поверхности паровой фазой; q_1' – часть плотности теплового потока q_1 , отводимого от греющей поверхности жидкой фазой и не передаваемой паровой фазе ; q_1'' – часть плотности теплового потока q_1 , отводимого от греющей поверхности жидкой фазой и передаваемой паровой фазе (паровому пузырьку, ещё не оторвавшимся от греющей поверхности); q_1''' – часть плотности теплового потока q_1 , отводимого от греющей поверхности жидкой фазой и передаваемой паровой фазе (паровому пузырьку, уже оторвавшимся от греющей поверхности); λ_l – коэффициент теплопроводности жидкости;

λ_{ef} – коэффициент теплопроводности КПС, насыщенной жидкостью;

λ_{ll} – теплопроводность микрослоя жидкости в основании (на дне) паровой поры;

δ_{ll} – толщина микрослоя жидкости в основании (на дне) паровой поры;

δ_{lf} – толщина микроплёнки жидкости на боковой стенке паровой поры.

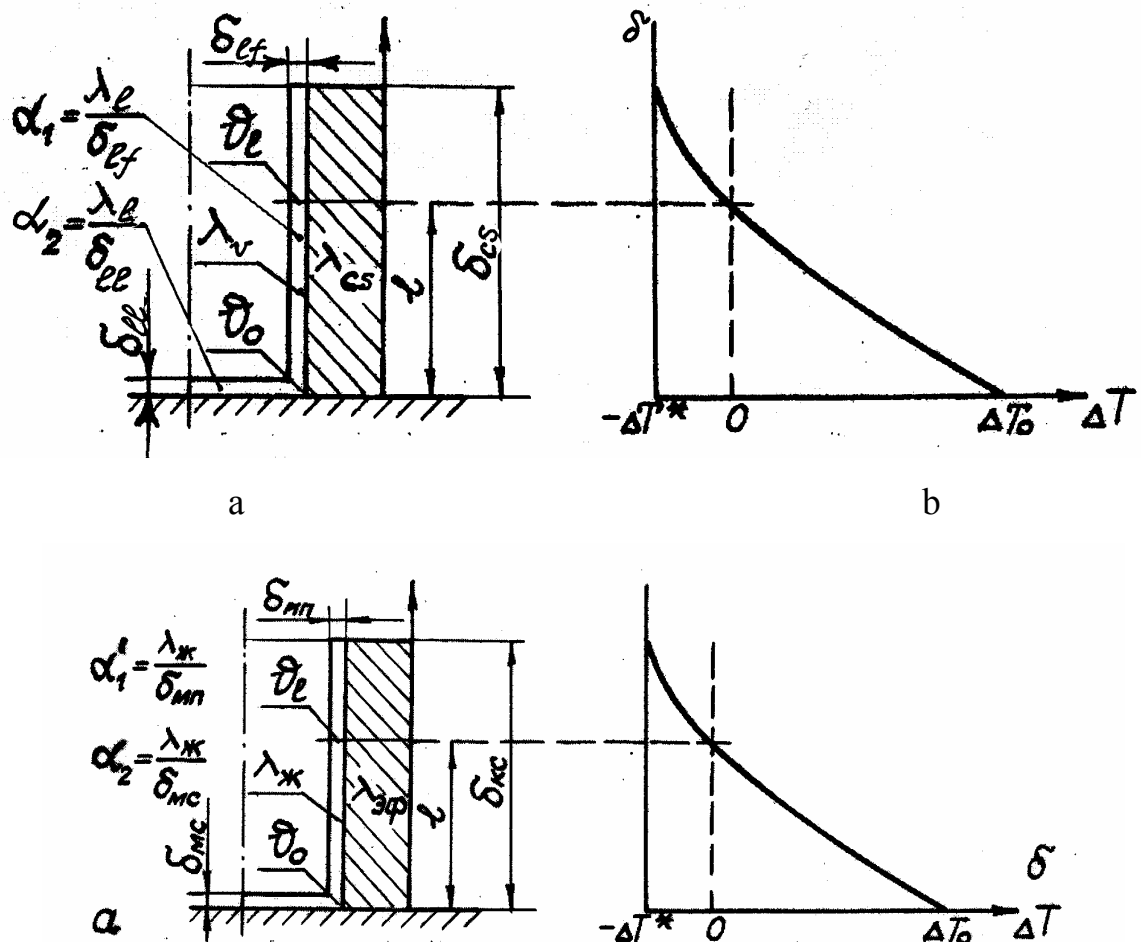


Рисунок 1.2.4 - Схема теплообмена в элементарной паровой поре: а - часть элементарной поры, соответственно модели; б - распределение температуры по высоте поры:

α_1 – коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности паровой поры;

α_2 – коэффициент теплоотдачи в основании (на дне) паровой поры;

ϑ_0 – разность температур греющей поверхности и кипящей жидкости;

ϑ_1 – разность температур боковой стенки паровой поры и кипящей жидкости;

ΔT - разность температур между стенкой (греющей поверхностью) и жидкостью;

ΔT^* - температурный напор (разность температур) начала кипения (закипания жидкости);

l – высота (координата Y);

ΔT_0 – расчётное значение ΔT .

Результаты расчета значения R'_1 в границах изменения характеристик КПС, исследованных в работе, позволили установить, что $3,4 \cdot 10^{-5} < R'_1 \leq 3,7 \cdot 10^{-3}$ (м²К)/Вт.

Для определения значения R'_1 необходимо рассмотреть схему теплообмена в единичной паровой поре (рис. 1.2.3,а). При решении задачи, аналогичной известной задаче теплопроводности в стержне, используем некоторые особенности в предельных условиях, которые можно считать корректными:

$$\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} - m^2 \vartheta = 0$$

$$m^2 = \frac{\alpha}{\lambda_{эф}} \cdot \frac{U}{f}$$

где ϑ – средняя разность температур скелета поры; $x=0$, $\vartheta_0 = \Delta T_0 - \Delta T^*$; $x=l$; $\vartheta = 0$ $x = \delta_{кс}$; $\vartheta = -\Delta T^*$.

Используя полученное решение, можно найти количество тепла, которое отводится стенками единичной паровой поры:

$$\frac{Q}{f} = \lambda_{эф} \cdot m \cdot \vartheta_0 \cdot 2ch \frac{ml}{\exp(ml) - 1}, \quad (2)$$

где $(m \cdot l)$ определяется из выражения:

$$\Delta T^* \cdot [\exp(ml) - 1] = 2(\Delta T - \Delta T^*) \cdot sh[m(\delta_{кс} - l)]. \quad (3)$$

Отношение периметра U условного цилиндрического ребра-стержня к его площади f приблизительно можно определить, исходя из

$$U = \pi D; \quad f = \pi \cdot D^2 / 4 = 1 - \varepsilon; \quad D = \sqrt{4 \cdot (1 - \varepsilon) / \pi}; \quad U/f = 4/D = [4\pi / (1 - \varepsilon)]^{0.5}. \quad (4)$$

Значение m по принятой схеме теплообмена может быть рассчитано по формуле

$$m = \sqrt{\frac{\lambda_{жс}}{\delta_{мп}} \cdot \frac{1}{\lambda_{эф}} \cdot \frac{U}{f}} = \sqrt{\frac{\lambda_{жс}}{\delta_{мп}} \cdot \frac{1}{\lambda_{эф}} \cdot \left(\frac{4\pi}{1 - \varepsilon}\right)^{1/2}}. \quad (5)$$

Для расчётов толщины микроплёнки жидкости, покрывающей стенки парогенерирующей поры, воспользуемся формулой

$$\delta_{мп} = 0,42 \cdot D \cdot \left(\frac{\mu_{жс} \cdot W_n}{\sigma_{жс}}\right)^{0,2}, \quad (6)$$

где $W_{\text{п}}$ – скорость пара в паровой поре (паровом канале), D - диаметр поры (канала), μ_l – динамический коэффициент вязкости жидкости, σ_l – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. $W_{\text{п}}$ можно определить по формуле:

$$W_n = 2 \cdot q_k \cdot \delta_{\text{кс}} / r_n \cdot \rho_n \cdot D \cdot \varphi, \quad (7)$$

где q_p – плотность теплового потока, средняя по высоте поры, r_v – удельная теплота парообразования (кипения), ρ_v – плотность пара, φ - коэффициент, учитывающий время прохождения по поре паровой и жидкой фазы. Результаты расчётов величины m свидетельствуют о том, что эта величина изменяется в интервале 50...1000.

Значение R_1'' , рассчитанная таким образом с учетом использованных формул и зависимостей изменяется в диапазоне $2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \leq R_1'' \leq 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$. Как ясно из методики расчета R_1'' , это значение существенным образом зависит от геометрических, структурных и теплофизических характеристик КПС, условий контакта КПС с несущей сплошной поверхностью, а также от величины температурного напора.

Значение R_2 в первом приближении может быть рассчитана, если известна толщина микрослоя в основании паровой поры. По результатам выполненных расчетов $\delta_{\text{мс}}$ равняется 10...15 мкм. По некоторым другим оценкам толщина микрослоя может находиться в диапазоне 5...50 мкм. Для этого диапазона $R_2 = (7-70) \cdot 10^{-6} (\text{м}^2\text{К})/\text{Вт}$. Принимая этот диапазон в качестве исходного и пренебрегая площадью возможного сухого пятна в центре паровой поры, считаем, что $R_2 = (7-70) \cdot 10^{-6} (\text{м}^2\text{К})/\text{Вт}$.

Таким образом, если предположить, что толщина микрослоя жидкости под пузырьком $\delta_{\text{мс}}$ с ростом плотности теплового потока незначительно уменьшается, то очевидно, что R_2 также может изменяться, причем это изменение - значительно слабее по сравнению со второй составляющей (R_1).

Рассчитав величины R_1' , R_1'' , R_2 при заданной совокупности характеристик КПС и плотности теплового потока, можно определить величину температурного напора ΔT . Для расчета ΔT также необходимо определять величину ε - отношение площади

оснований паровых пор к площади поверхности нагрева F . В общем случае ε зависит от геометрических, теплофизических и структурных характеристик КПС, в том числе, распределения пор по размерам. Результаты практических расчетов свидетельствуют о том, что влияние каждой из характеристик, определяющих параметры КПС, на величину ε сказывается по-разному. В конечном итоге величина ε зависит от совокупности физических характеристик КПС, и ее можно представить в виде эмпирической зависимости

$$\varepsilon = k \cdot q^{n_1} \cdot \delta_{кс}^{n_2} \cdot \lambda_{к}^{n_3} \cdot \Pi^{n_4} \cdot D_{эф}^{n_5}, \quad (8)$$

где $n_1 - n_5$ - показатели степеней и постоянную k можно определить экспериментально. Характер изменения величины ε - консервативный, что облегчает практическое использование зависимости (8).

Результаты расчетов термических сопротивлений R_1^1, R_1^2, R_2 свидетельствуют о соизмеримости этих величин. Таким образом, можно предполагать, что изменение в широком диапазоне физических характеристик КПС и условия контакта КПС с теплонапряженными сплошными несущими поверхностями способны существенным образом влиять на характер и интенсивность теплообмена при кипении на пористых поверхностях.

ВТОРОЙ КВАРТАЛ 2007 Г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР	22
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР	30
ЛИТЕРАТУРА	36

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Проведены комплексные исследования гидродинамических, структурных, физико-механических и капиллярно-транспортных характеристик перспективных с точки зрения использования их в качестве капиллярных структур (КС) пористых материалов из волокон и порошков нержавеющей стали. Объектом исследования служили слоистые чисто волоконные материалы, содержащие слои из волокон диаметром 50 и 30 мкм, каркасные волоконно-порошковые композиции в виде волоконного каркаса из волокон диаметром 50 и 30 мкм, заполненного частично порошком дисперсностью 40 и 80 мкм. Макроструктура слоев композиции волокно-порошок представлена на рис. 2.1.1.

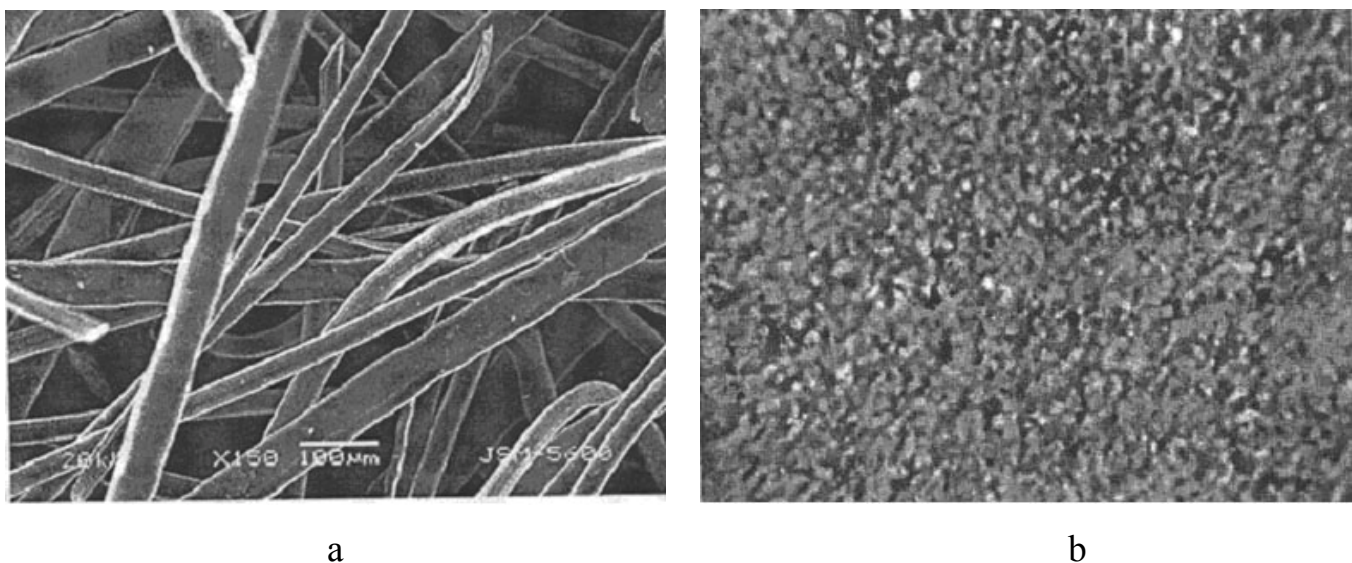


Рис. 2.1.1 Макроструктура композиций волокно-порошок:

а – слой из волокон \varnothing 30 мкм; б – слой порошка дисперсностью 80 мкм

Технологию изготовления опытных образцов материалов условно можно разбить на два этапа. На первом - изготавливали листовые заготовки размером 1...3×100×350 мм путем равномерного и послойного виброосаждения волокон и порошков, их спеканием и прокаткой. Второй этап предусматривал получение из

спеченных листовых заготовок с заданными структурными характеристиками образцов диаметром 20 мм для структурных исследований, пластин размером 1...3×6×80 мм для определения физико-механических свойств и пластин размером 1...2×20×300 мм для изучения кинетики капиллярного впитывания.

Анализ процессов, протекающих в тепловых трубах, показывает, что идеальный проницаемый материал для капиллярной структуры должен удовлетворять целому ряду, порой противоречивых, требований:

1. Возможность реализации и изменения в широком диапазоне структурных, гидродинамических и физико-механических характеристик.
2. Возможность изготовления тонколистовых заготовок больших размеров с равномерной пористой структурой.
3. Максимальная теплопроводность пористого каркаса.
4. Воспроизводимость свойств и возможность их количественного прогнозирования.

При этом основными характеристиками любого пористого материала, предполагаемого в качестве КС, являются, как следует из уравнения баланса давлений [1], коэффициент проницаемости и средний размер пор, которые оказывают значительное влияние на скорость течения теплоносителя.

Средний диаметр пор в образцах рассчитывали по двум экспериментальным характеристикам материала - открытой пористости и воздухопроницаемости. Этот расчет основан на допущении, что все поровые каналы цилиндрической формы, параллельны друг другу, имеют постоянное сечение и пронизывают материал параллельно его поверхности. Опытные образцы диаметром 20 мм, толщиной 1 мм и пористостью 70...90 % зажимались в специальной обойме и продувались воздухом. Перепад давления на образце измерялся дифференциальным манометром, а расход воздуха – расходомером. Полученные зависимости расхода от перепада давления обрабатывались по формуле [2] для нахождения среднего диаметра в мкм.

$$D_{cp} = 55,56 \sqrt{\frac{K}{\Theta}} \quad (1)$$

где: K – коэффициент газопроницаемости, $\times 10^{-12}$, м^2 ;

Θ - пористость, %

Представленные в таблице 1.1 результаты исследования структурно-гидродинамических характеристик высокопористых образцов из волокон и порошков нержавеющей стали показали, что волокново-порошковые композиции превосходят однослойные и двухслойные чисто волокновые материалы по размеру пор.

Как следует из рис.2.1.2, образцы, содержащие слой из волокон диаметром 50 мкм и слой из порошка дисперсностью 80 мкм при пористости 80 % по сравнению с однослойными и двухслойными чисто волокновыми образцами обладают порами в 1,2 и 2,2 раза меньшего размера.

Со снижением пористости и повышением дисперсности волокон и порошков размеры пор в чисто волокновых образцах снижаются, но значений, присущих волокново-порошковым композициям, они не достигают.

Наблюдаемые различия в размерах пор в исследуемых пористых материалах обусловлены прежде всего различной плотностью укладки металлических волокон и порошков без нагрузки и особенностями их уплотнения под нагрузкой [3]. Поэтому диапазон изменения пор по толщине в волокново-порошковых композициях увеличивает.

Например, в материале пористостью 64 %, содержащем слой из волокон диаметром 30 мкм с максимальным и средним размером пор 100 и 45 мкм, и слой из порошка дисперсностью 40 мкм с размерами пор 9 и 2 мкм соответственно градиент размеров пор по толщине материала, исходя из максимальных размеров пор равен 10, а средних пор – 22 (рис.2.1.3).

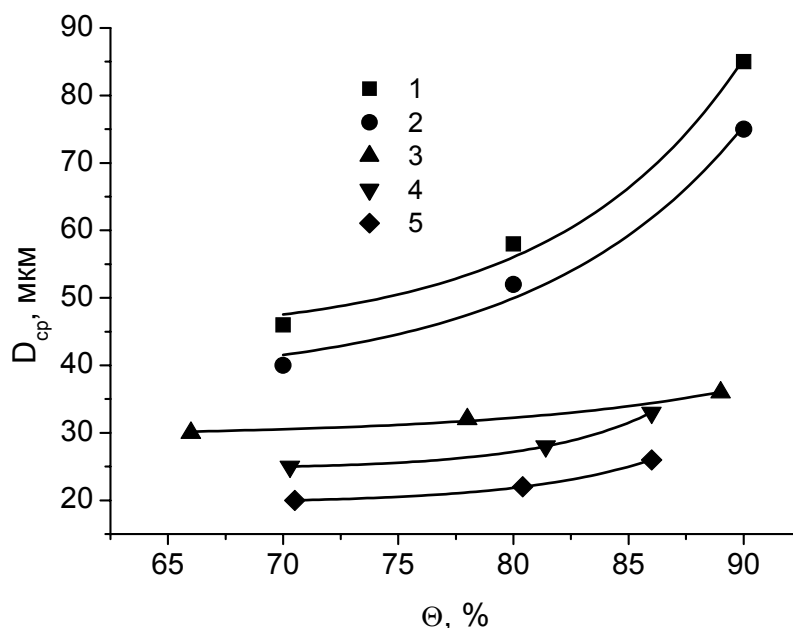


Рис. 2.1.2. Зависимость среднего размера пор от пористости одно и двухслойных материалов из волокон и порошков нержавеющей стали:

1 – слой из волокон \varnothing 50 мкм; 2 – слой из волокон \varnothing 30 мкм; 3 – композиция в виде слоя из волокон \varnothing 50 мкм и слоя из волокон \varnothing 30 мкм; 4 – композиция в виде каркаса из волокон \varnothing 50 мкм частично заполненного порошком дисперсностью 80 мкм; 5 – композиция в виде каркаса из волокон \varnothing 30 мкм частично заполненного порошком дисперсностью 40 мкм

Из всего комплекса физико-механических свойств, которыми обладают разработанные материалы, для изучения выбраны представляющие наибольший интерес: проводимость и прочность.

Электросопротивление опытных образцов материалов измеряли на специальной установке при комнатной температуре.

Модуль упругости определяли статическим методом в условиях испытаний на четырех-точечный изгиб [4] с помощью испытательной машины, оснащенной высокочувствительным датчиком с точностью $\pm 5\%$.

Проведенные исследования показали, что зависимости электропроводности и модуля упругости от пористости имеют аналогичный характер. Чисто волокновые

материалы превосходят по электропроводности и упругости слоистые композиции во всем диапазоне изменения пористости, а каркасные – только в области высокой пористости (более 60 %) (рис.2.1.4).

Таблица 1.1

Результаты исследований структурно-гидравлических характеристик образцов из волокон и порошков нержавеющей стали

№ п/п	Толщина, мм	Пористость, %	Коэффициент проницаемости, $\times 10^{-12}$, м ²	Средний гидравлич.размер пор, мкм	Состав образцов
1	1	70		46	Слой из волокон \varnothing 50 мкм
2	1	80		58	
3	1	90		85	
4	1	70		40	Слой из волокон \varnothing 30 мкм
5	1	80		52	
6	1	90		75	
7	1	66	20	30	Двухслойная композиция: один слой - волокна \varnothing 50 мкм, другой – волокна \varnothing 30 мкм
8	1	78	25	32	
9	1	89	32	36	
10	1	70,3	17	25	Композиция в виде каркаса из волокон \varnothing 50 мкм частично заполненного порошком дисперсностью 80 мкм
11	1	81,4	21	28	
12	1	86	26	31	
13	1	70,5	12	20	Композиция в виде каркаса из волокон \varnothing 30 мкм частично заполненного порошком дисперсностью 40 мкм
14	1	80,4	17	23	
15	1	86	22	26	

Различия в проводимости и упругости исследуемых материалов можно объяснить исходя из представлений о механизмах уплотнения входящих в их состав металлических волокон и порошков. Известно, что по сравнению с чисто контактным характером уплотнения порошков при облегченном перемещении частиц путем взаимного проскальзывания, при уплотнении волокон происходит не только контактная, но и обратимая и необратимая изгибная пластическая деформация. При этом первоначально прямые волокна, встречаясь в местах контакта с другими волокнами, обретают спиральную форму с образованием многочисленных межволоконных контактов [3]. Этим, по-видимому, и обусловлена высокая электропроводность волоконных материалов.

В слоистых волоконово-порошковых композициях вклад в процесс контактообразования механизма с гибко-жестким характером уплотнения уменьшается. С этим, прежде всего, и связана их наиболее низкая электропроводность.

Оба выше указанных механизма уплотнения имеют место в каркасных композициях, но условия для их реализации в таких материалах ухудшаются. В каркасных материалах поры частично или полностью заполнены порошком и поэтому изгиб волокон затруднен.

Процесс осаждения порошка в волоконный каркас сопровождается образованием новых многочисленных волоконово-порошковых контактов, чем и обусловлена неоднозначная зависимость проводимости и упругости таких материалов от пористости. В области высокой пористости, когда возможности для образования качественных межчастичных контактов малы, каркасные материалы уступают по проводимости и упругости чисто волоконным материалам. В области низкой пористости с повышением качества контактов каркасные композиции превосходят по электропроводности и упругости чисто волоконные материалы.

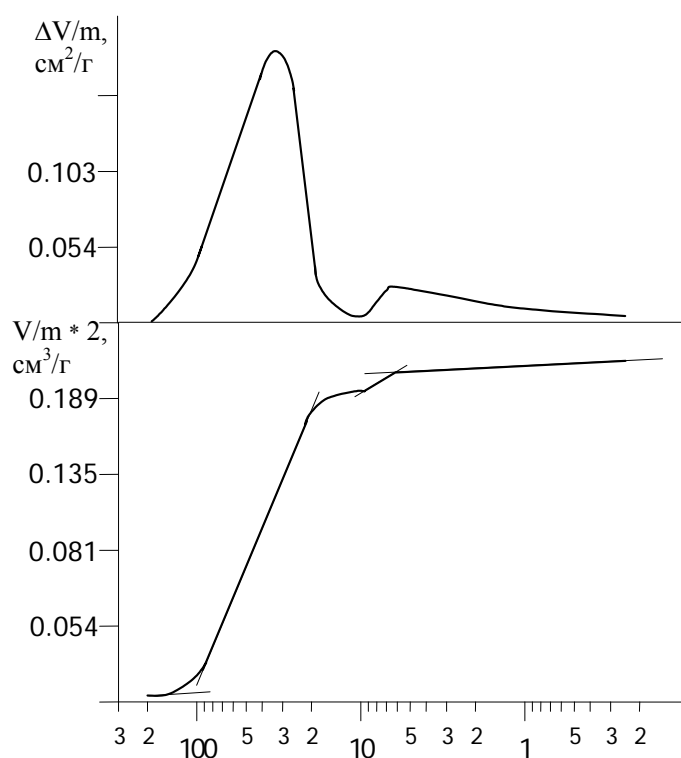


Рис.2.1.3. Дифференциальная и интегральная кривые распределения пор в материале, содержащем слой из волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 1,5 мм и слой порошка дисперсностью 40 мкм толщиной 0,5 мм

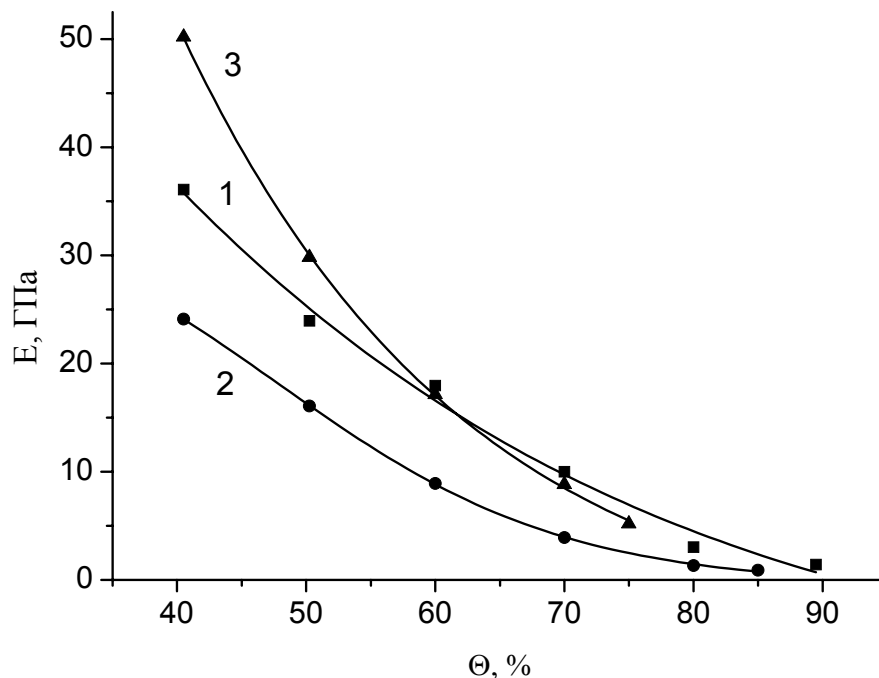


Рис.2.1.4. Зависимость модуля упругости пористых одно и двухслойных образцов из волокон и порошков нержавеющей стали:

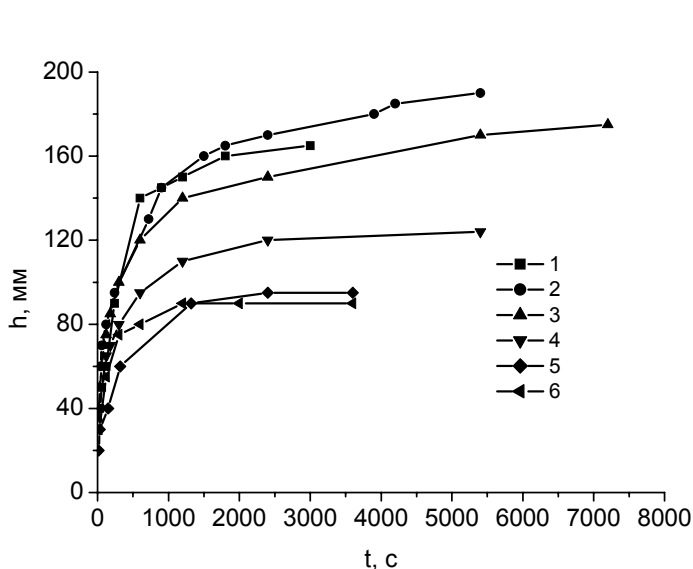
1 – материалы из волокон диаметром 40 мкм; 2 – слоистые композиции (волоконно \varnothing 40 мкм, порошок дисперсностью 160 мкм); 3 – каркасные композиции (волоконно \varnothing 40 мкм, порошок дисперсностью 40 мкм)

Ограничение теплопередающей способности из-за транспортных свойств не является одним из основных в работе низкотемпературных тепловых труб (ТТ). Транспортные свойства КС, определяемые проницаемостью, средним размером пор и распределением пор в материале, оцениваются в конечном итоге по скорости течения и предельной высоте подъема теплоносителя. На скорость и высоту подъема влияет также краевой угол смачивания, но он зависит лишь от поверхностных явлений на границе раздела материал КС – теплоноситель.

Кинетику капиллярного транспорта изучали в специальной установке. Образец с помощью направляющего стержня устанавливали вертикально в рабочей камере. Полоски из сухого гигроскопического материала прижимаются к поверхности пористого образца зажимами, последовательно подключенными к многоканальному сигнализатору уровня и цифровому вольтметру. Рабочая камера с подсветкой позволяет также визуально следить за перемещением фронта рабочей жидкости при давлении, создаваемом насыщенным паром этой жидкости. Через мерную бюретку установка заполняется жидкостью до определенного уровня. Для контакта с жидкостью образец опускается с помощью сиффона. При подъеме жидкости под действием капиллярных сил поочередно к каждому из датчиков происходит замыкание электрической цепи, что фиксируется сигнализатором уровня и цифровым вольтметром.

Объектом исследования служили высокопористые слоистые чисто волокновые и каркасные волокнуно-порошковые образцы из нержавеющей стали в виде полос $1...2 \times 20 \times 300$ мм. В качестве рабочей жидкости использовался этанол. Капиллярный транспорт этанола изучали при давлении насыщенного пара в камере вплоть до полной пропитки образца длиной 300 мм. В зависимости от параметров пористой структуры материала время пропитки составляло 3...10 часов.

Некоторые результаты экспериментального исследования кинетики капиллярного впитывания этанола разработанными пористыми материалами представлены на рис.1.5.



- 1- композиция волокно \varnothing 50 мкм + порошок дисперсностью 80 мкм, пористость – 81,4 %;
- 2- композиция волокно \varnothing 50 мкм + порошок дисперсностью 80 мкм, пористость – 67,5 %;
- 3- композиция волокно \varnothing 30 мкм + порошок дисперсностью 40 мкм, пористость – 65 %;
- 4- композиция волокно \varnothing 50 мкм + порошок дисперсностью 80 мкм, пористость – 85,6 %;
- 5- композиция волокно \varnothing 50 мкм + волокно \varnothing 30 мкм, пористость – 85 %;
- 6- слой волокон \varnothing 30 мкм, пористость – 82 %

Рис. 2.1.5. Изменение в зависимости от времени высоты капиллярного поднятия этанола в материале из волокон и порошков нержавеющей стали.

Как следует из рис. 2.1.5, пористые волокнуно-порошковые композиции характеризуются достаточно высокой капиллярно-транспортной способностью и значительно превосходят пористые однослойные и двухслойные чисто волокнуные материалы по скорости и высоте подъема этанола при работе против сил гравитации. При этом композиции из волокон диаметром 50 мкм и порошка дисперсностью 80 мкм, отличающиеся лучшим сочетанием характеристик проницаемости и размеров пор, выявили наибольшую эффективность капиллярного переноса этанола.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности использования пористых волокнуно-порошковых композиций в качестве КС ТТ.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Расчёты теплофизических характеристик тепловых труб (ТТ), в частности, максимальной теплопередающей мощности (Q_{hp}) и термического сопротивления (R_{hp}) основаны на том, что разработчикам (конструкторам) ТТ должны быть предварительно известны значения коэффициентов теплоотдачи α , т.е.,

количественные характеристики интенсивности теплообмена в зонах теплоподвода и теплоотвода ТТ. Неизотермичность указанных зон позволяет рассчитывать только средние значения коэффициентов α (по длине зоны). Из-за сложности точного расчёта и определения коэффициентов теплоотдачи α непосредственно в ТТ значения α получают с помощью экспериментальных установок (стендов), в условиях, моделирующих работу ТТ. Такие установки для исследований теплообмена при испарении и кипении на поверхностях с капиллярными структурами (КС) ТТ созданы в ИПМ НАНУ. Установки позволяют экспериментальным путём получать реальные значения коэффициентов теплоотдачи α для различных типов пористых структур в условиях как «залитых» жидкостью КС, так и в условиях «капиллярной подпитки» жидкости-теплоносителя.

Схема-конструкция экспериментальной установки ИПМ для указанных исследований представлена на рисунке 2.2.1.

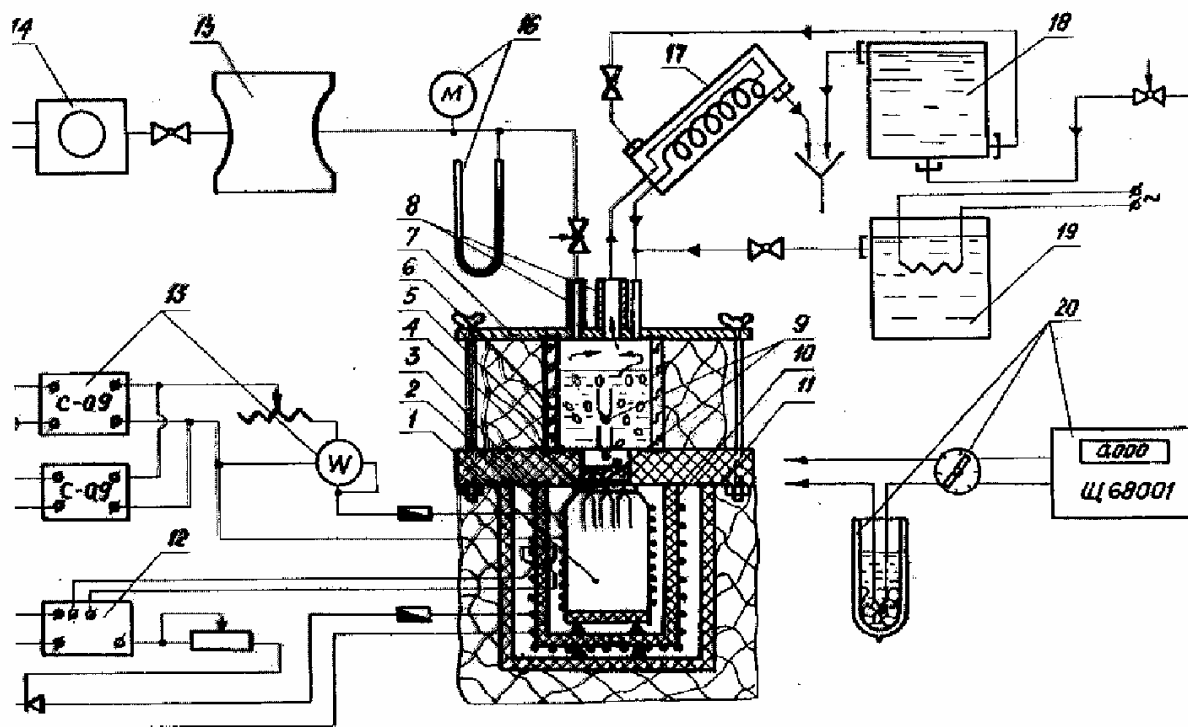


Рисунок 2.2.1 – Схема установки ИПМ НАН Украины для теплофизических исследований теплообмена при кипении на поверхностях с капиллярными структурами в условиях, типичных для ТТ:

1- медный стержень-клин; 2 – основной нагреватель; 3 – охранный нагреватель; 4 – образец капиллярной структуры; 5 – фланец; 6- цилиндр; 7 – крышка; 8 – штуцеры; 9 – термопары; 10 – стакан; 11 – кожух; 12 – система с охранным нагревателем; 13 – система стабилизации напряжения и измерения мощности; 14 – вакуумный насос; 15 – ресивер; 16 – измерительные приборы; 17 – конденсатор; 18 – бак; 19 – ёмкость; 20 – система измерения температуры

На рисунке 2.2.2 представлены схемы-конструкции рабочих участков экспериментальной установки, предназначенные для исследований, типичных для различных условий работы ТТ

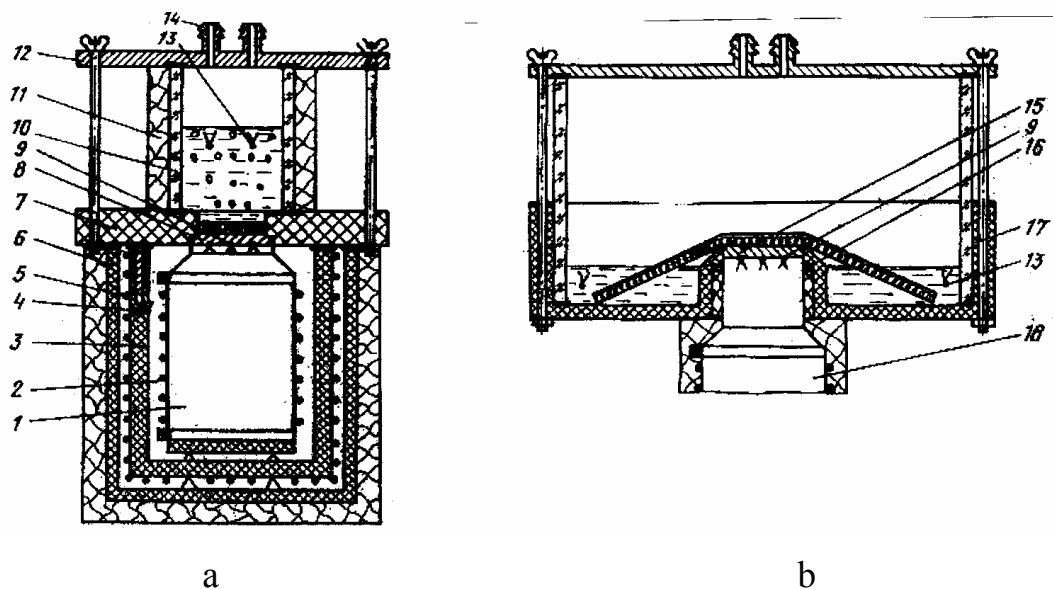
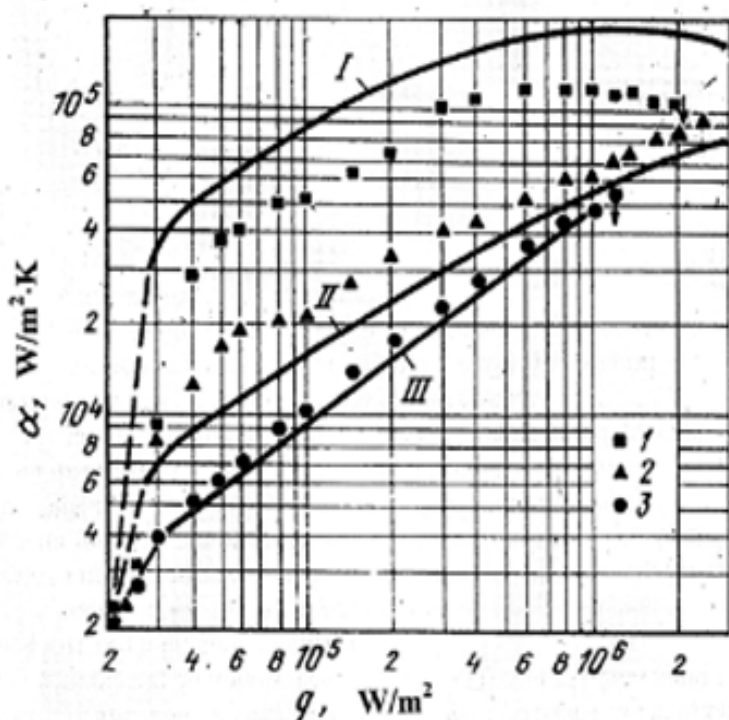


Рисунок 2.2.2 – Конструкция рабочих участков для теплофизических исследований кипения на поверхностях ТТ с нанесенными КС для условий: а – «залив» жидкости; б – «капиллярная подпитка»:

1 – медный теплоподвод; 2 – электронагреватель; 3 – стакан; 4 – термопара; 5 – охранный нагреватель; 6 – защитный стакан; 7 – фторопластовый фланец; 8 –

термопары; 9 – опытный образец КС; 10 – стеклянный стакан; 11 – теплоизоляция; 12 – фланец; 13 – термопары; 14 – штуцеры; 15 – пористая структура; 16 – упор; 17 – фланец; 18 – медный клин

Некоторые результаты исследований интенсивности кипения воды на поверхностях с медными волоконными КС (при атмосферном давлении) представлены на рисунке 2.2.3 в виде зависимости изменения коэффициентов теплоотдачи α [Вт/м²·К] от плотности теплового потока q [Вт/м²].



Экспериментально полученные кривые:

I – максимальные значения α на поверхностях с МВКС;

II – минимальные значения α на поверхностях с МВКС;

III – значения α на гладких технических поверхностях (сведения из литературы);

экспериментально полученные точки:

1 – пористость КС $\theta = 40\%$; толщина КС = 0,6 мм;

2 – пористость КС $\theta = 40\%$; толщина КС = 0,6 мм;

3 – гладкая техническая поверхность; стрелкой показан кризисный режим кипения

Рисунок 2.2.3 – Интенсивность теплообмена при кипении воды на поверхностях с медными металловолокновыми КС в условиях «залива» (рабочий участок А установки)

Анализ экспериментальных результатов, представленных на рисунке 2.2.3, свидетельствует о том факте, что среднепористые металловолокновые структуры (точки 1) обеспечивают высокие значения коэффициентов теплоотдачи α (в 5-10 раз выше значений, типичных для кипения на гладких технических поверхностях). Высокопористые МВКС (точки 2) дают значения α , меньшие значений, характерных для среднепористых МВКС, однако они обеспечивают очень высокие значения

критической плотности теплового потока q_{cr1} (при которой наступает кризис кипения) – в 3-4 раза больше значений, типичных для гладких технических поверхностей.

Полученные результаты обусловили идею создания «гибридных» или так называемых «градиентных» металловолоконных капиллярных структур, сочетающих положительные теплофизические свойства среднепористых и высокопористых КС. Последние созданы в виде чередующихся по площади теплообмена участков с МВКС средней и высокой пористости (см. рис. 2.2.4).



Рисунок 2.2.4 – Образцы «градиентных» металловолоконных капиллярных структур с переменной (по площади теплообменной поверхности) пористостью

Ряд экспериментальных результатов, полученных на установке ИПМ для условий кипения воды на поверхностях с градиентными капиллярными металловолоконными структурами, представлен на рисунке 2.5. Соотношение

площади «среднепористая структура – высокопористая структура» ($\theta_{mcs}/(\theta_{hcs})$) изменялось в диапазоне 0,5 – 0,85. Значения плотности теплового потока q изменялись в диапазоне $(0 – 250) \cdot 10^4$ Вт/м².

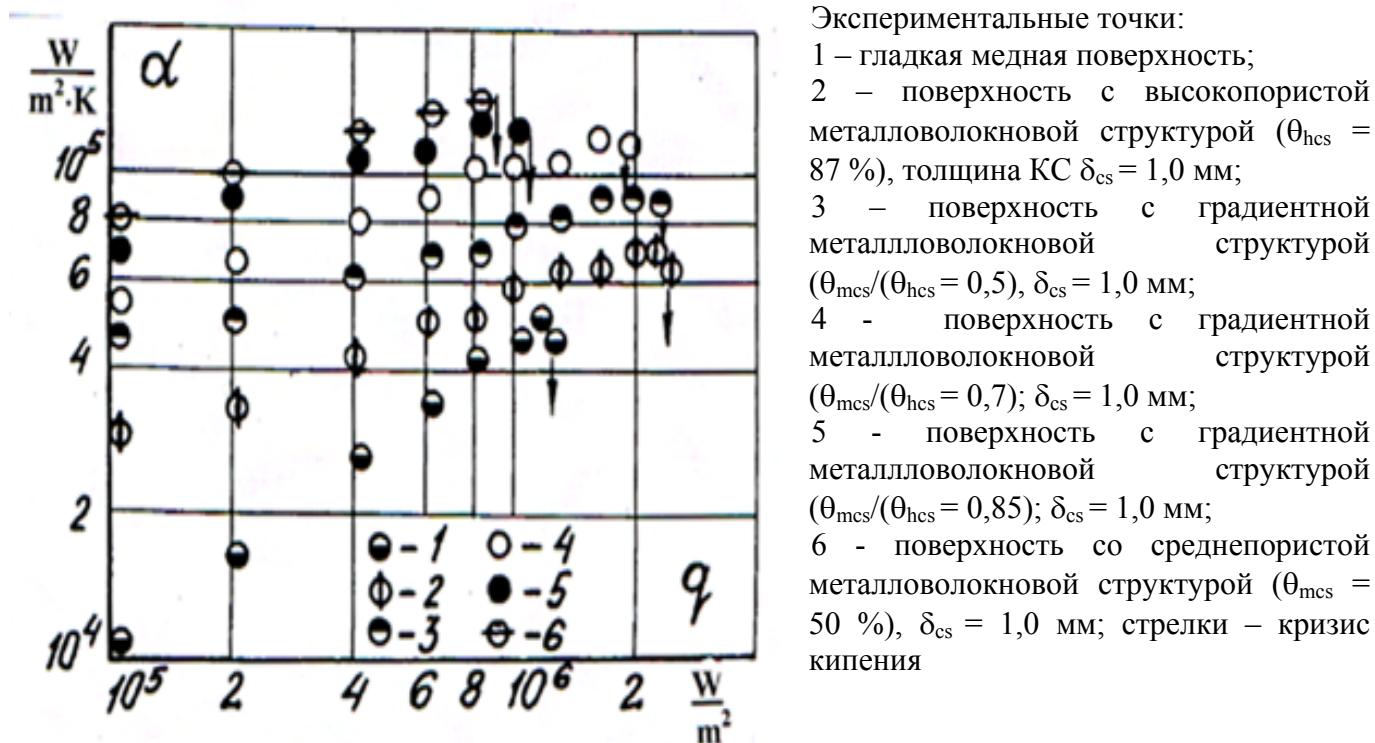


Рисунок 2.2.5 – Интенсивность теплообмена при кипении воды в условиях «залива» на поверхностях с обычными и градиентными металловолоконными структурами

Анализ полученных экспериментальных результатов подтверждает целесообразность создания «гибридных» (или «градиентных») капиллярных структур. Известно, что высокопористые капиллярные структуры обеспечивают высокие транспортные характеристики тепловых труб. Среднепористые структуры, кроме высоких значений интенсивности теплообмена, обеспечивают высокие значения капиллярного поднятия жидкости. Они лучше применимы для ТТ, работающих в условиях противодействия гравитационных сил. Имея арсенал надёжных экспериментальных данных – значений коэффициентов теплоотдачи для различных диапазонов изменения характеристик капиллярных структур и

жидкостей-теплоносителей, становится возможным целенаправленное управление характеристиками ТТ в процессе конструирования, с учетом конкретных условий функционирования тепловых труб целевого назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.C., J.H. Streckert. Performance of Wick-Limited Heat Pipe, ASME Paper, №69-NT-20, 1969.
2. А.С.Беркман, И.Г.Мельникова. Пористая проницаемая керамика. Изд. лит. по строительству. Ленинград, 1969.
3. А.Г.Косторнов. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Том 2. Киев: Наукова думка, 2003.
4. Структура и прочность порошковых материалов. Под ред. чл.-корр. С.А.Фирстова и чл.-корр. М.Шлесара, - Киев: Наукова думка, 1993.

ТРЕТИЙ КВАРТАЛ 2007 Г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
3.1 ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	41
3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КС ДЛЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ТТ	47
<i>3.2.1 Термосопротивление ТТ</i>	<i>47</i>
<i>3.2.2 Расчеты максимальной теплопередающей способности тепловых труб</i>	<i>49</i>
<i>3.2.3 Расчёты коэффициентов теплоотдачи в зонах нагрева тепловых труб</i>	<i>52</i>
ВЫВОДЫ	55
ЛИТЕРАТУРА	55

3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для расчёта характеристик тепловых труб, в которых используются капиллярно-пористые материалы, необходимо иметь сведения о гидродинамических (или капиллярно-транспортных) характеристиках таких материалов. К этим характеристикам относят, в первую очередь, высоту капиллярного поднятия жидкости и, во-вторых, скорость движения жидкости-теплоносителя в пористой структуре. Указанные характеристики определяются, как правило, экспериментальными методами.

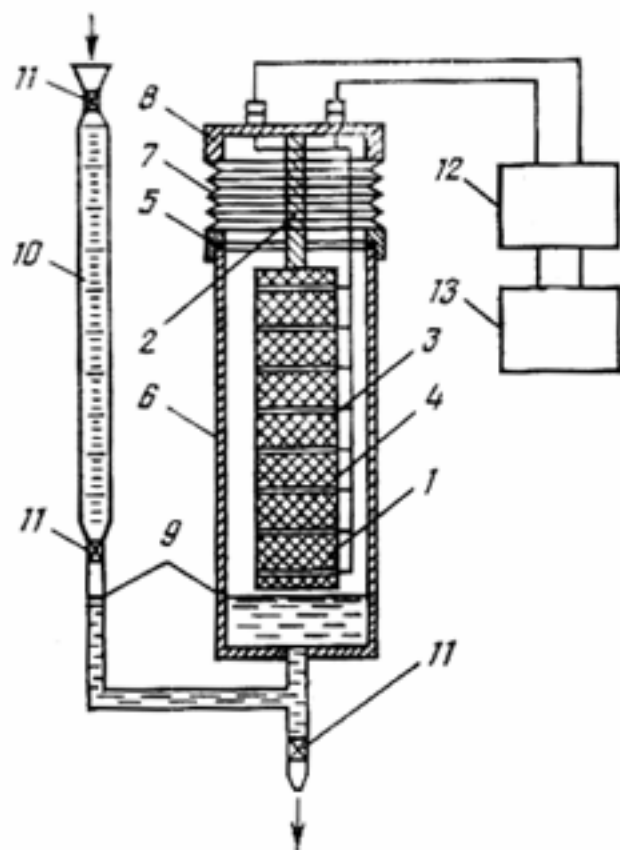
Экспериментальные исследования гидродинамических процессов в капиллярно-пористых материалах (структурах) (КС) и определение их транспортных характеристик выполнены на опытной установке, разработанной и созданной в Институте проблем материаловедения НАН Украины (рис. 3.1.1, 3.1.2). Известно, что при отсутствии градиента давлений жидкость в пористом теле перемещается под действием капиллярного напора, определяемого по формуле

$$\Delta P = 4 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha / D_{\text{эф}}, \quad (3.1.1)$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости; α - угол смачивания; $D_{\text{эф}}$ — средний эффективный размер пор материала. Капиллярный напор уравнивается потерями давления в жидкости из-за трения в материале, которые для ламинарного потока составляют

$$\Delta P_L = 32 \cdot V \cdot \mu \cdot L \cdot B^2 / D_{\text{эф}}^2, \quad (3.1.2)$$

где V — средняя скорость течения жидкости с вязкостью μ ; L — расстояние, на которое переместился фронт жидкости в материале; B — коэффициент извилистости поровых каналов.



1 — образец КС; 2 — направляющий стержень; 3 — зажимы; 4 — датчики; 5 — прокладка; 6 — камера; 7 — сиффон; 8 — крышка; 9 — уровень жидкости; 10 — бюретка; 11 — вентиль; 12 — сигнализатор уровня; 13 — цифровой вольтметр

Рисунок 3.1.1 — Схема экспериментальной установки ИПМ НАН Украины для исследований влияния характеристик капиллярно-пористых структур на высоту и скорость капиллярного поднятия жидкостей

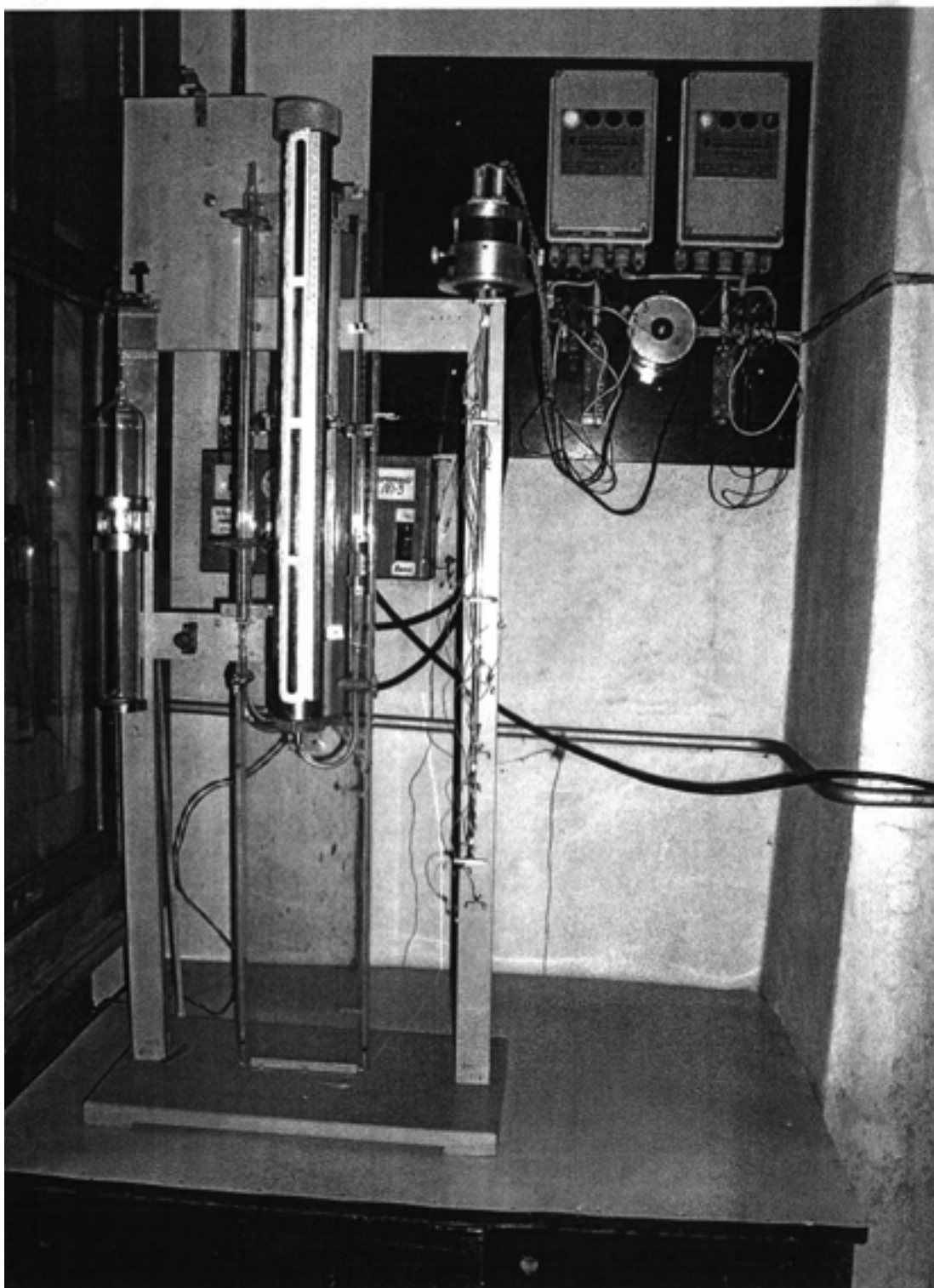


Рисунок 3.1.2 — Экспериментальная установка ИПМ НАН Украины для исследований гидродинамических характеристик капиллярно-пористых материалов

В общем случае, при произвольной ориентации образцов материала в пространстве, капиллярный напор уравнивается разностью давлений в жидкости, обусловленной силами гравитации

$$\Delta P_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot \sin \varphi, \quad (3.1.3)$$

где ρ — плотность жидкости, g — ускорение силы тяжести, φ — угол наклона образца.

Максимальная скорость капиллярного впитывания равна

$$V_{\max} = D_{\text{эф}}^2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha / 8 \cdot \mu \cdot L \cdot B^2, \quad (3.1.4)$$

а максимальная высота капиллярного подъема жидкости

$$H_{\max} = 4 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha / D_{\text{эф}} \cdot \rho \cdot g. \quad (3.1.5)$$

Модельная связь между кинетикой пропитки, параметрами структуры пористого тела и физическими свойствами жидкости позволяет количественно оценивать закономерности перемещения потока в порах материала, а также работу адгезии на границе раздела твердой и жидкой фаз. Необходимые данные о характеристиках порового пространства получают предварительно на образцах КС с регулярной пористой структурой. При этом средний гидравлический диаметр поровых каналов определяют методом вытеснения жидкости из пор газом (ГОСТ 26849 - 86), а коэффициент извилистости B вычисляют по отношению равновесного среднего гидравлического диаметра пор к его значению, определенному методом газопроницаемости. При изучении кинетики капиллярного транспорта образец КС с помощью направляющего стержня устанавливают вертикально в рабочей камере. Полоски шириной 3 мм из сухого гигроскопического материала прижимают к поверхности пористого образца зажимами, последовательно подключенными к многоканальному сигнализатору уровня 12 и цифровому вольтметру. Рабочая камера с подсветкой позволяет визуально следить за перемещением фронта рабочей жидкости как при давлении ее насыщенного пара, так и под вакуумом ($10-10^3$ Па). Через мерную бюретку установка заполняется жидкостью до рабочего уровня. Для

контакта с жидкостью образец опускается с помощью сильфона. При капиллярном впитывании жидкости образцом КС электрическая цепь поочередно замыкается на зажимах, что фиксируется сигнализатором уровня и цифровым вольтметром по изменению величины тока. При исследованиях фиксируют кривую изменения высоты капиллярного поднятия H во времени τ , вплоть до достижения равновесного значения H_{\max} . Из функции $H = f(\tau)$ графическим дифференцированием получают изменение скорости впитывания во времени: $dH/d\tau = f(\tau)$. В тех случаях, когда размеры образца пористого материала в направлении капиллярного транспорта меньше H_{\max} , функцию $dH/d\tau = f(\tau)$ преобразовывают в линейную: $dH/d\tau = \psi(1/H)$, пересечение графического отображения которой с осью абсцисс позволяет найти H_{\max} . Расхождение между определенной таким образом высотой подъема жидкости и ее значением, полученным прямым измерением, не превышает 4-6 %.

Количественная оценка кинетики капиллярной пропитки предполагает знание краевого угла смачивания материала рабочей жидкостью. Для пористого материала с известными структурно-гидродинамическими характеристиками угол смачивания α можно определить из простого соотношения:

$$\cos \alpha_2 = \sigma_1 \cdot \rho_2 \cdot H_{\max 2} \cdot \cos \alpha_1 / \sigma_2 \cdot \rho_1 \cdot H_{\max 1}, \quad (3.1.6)$$

где индекс 1 относится к свойствам эталонной (с известным углом смачивания) жидкости, а индекс 2 — к свойствам исследуемой жидкости. Углы смачивания исследованы, в частности, в [1, 2]. В [1, 2] также показано, что при перемещении жидкости против сил гравитации наиболее эффективными являются пористые структуры с максимальной проницаемостью и минимальным эффективным размером пор. Оценка скорости капиллярной пропитки металлических волоконных структур, расположенных под некоторым углом к горизонту ($\varphi = 15^\circ$, частичное действие сил гравитации), с использованием аналитического уравнения (3.1.4) показывает хорошие результаты.

Результаты исследования гидродинамических свойств металлических волоконных и волокнуно-порошковых капиллярных структур приведены в таблицах 3.1.1 и 3.1.2.

Таблица 3.1.1

Гидродинамические характеристики металлических волоконных структур, разработанных в ИИМ для применения в тепловых трубах (рабочая жидкость — этанол)

Материал	Пористость, Θ , %	Эффективный диаметр пор, $D_{эф}$, мкм	Коэффициент проницаемости, $K \cdot 10^{11}$, m^2	Высота капилляр. поднятия, H_{max} , мм	Критерий транспортной способности, $K / D_{эф} \cdot 10^2$, мм
Медь	59,0	60,0	2,5	311	41,7
	61,2	59,0	5,6	> 480	94,9
	70,0	55,0	7,3	> 480	132,7
	79,0	60,0	5,5	> 480	91,6
	79,2	125,0	33,5	290	268,0
	79,4	83,5	18,8	355	225,1
	80,0	92,0	15,5	362	168,5
	88,5	156,0	45,2	180	289,7
	90,0	110,0	25,5	270	231,8
95,0	198,0	48,3	—	243,9	

Таблица 3.1.2

Гидродинамических характеристик волоконно-порошковых композиций из нержавеющей стали.

Материал	Пористость структур, %	Средний гидравлический размер пор, мкм	Коэффициент проницаемости $\times 10^{12}$, m^2	Высота поднятия этанола в течение одного часа, мм
Слой волокно \varnothing 50 мкм, толщиной 1 мм	78	50	55	70
Волокно \varnothing 30 мкм, толщиной 1 мм	78	45	50	90
Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 0,75 мм; слой волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 0,25 мм	67	30	20	90
	78	32	25	80
	88	36	32	70
Слой волокон \varnothing 50 мкм, толщиной 1 мм заполненный порошком с размером частиц 80-100 мкм на глубину 0,25 мм	70	25	17	180
	81	28	21	160
	86	31	26	115
Слой волокон \varnothing 30 мкм, толщиной 1 мм заполненный порошком с размером частиц менее 40 мкм на глубину 0,25 мм	70	20	12	150
	80	23	17	130
	86	26	22	100

3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КС ДЛЯ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ТТ

3.2.1 Термосопротивление ТТ

Как известно, основными расчётными параметрами тепловых труб при их разработке и создании являются: 1) предельный тепловой поток Q_{hp} (Вт), передаваемый ТТ; 2) величина общего термического сопротивления ТТ R_{hp} (К/Вт). Общее термическое сопротивление ТТ состоит из суммы (цепочки) частных термических сопротивлений тепловому потоку при подводе и отводе его от ТТ.

В общем виде процесс передачи тепла тепловой трубой от наружной поверхности испарителя к наружной поверхности конденсатора можно разделить на несколько ступеней:

- подвод тепла от внешнего источника;
- передача тепла теплопроводностью в радиальном направлении через корпус тепловой трубы;
- передача тепла теплопроводностью через смоченный фитиль;
- передача тепла теплопроводностью в аксиальном направлении по корпусу тепловой трубы;
- генерация пара;
- передача тепла молярным путем (паром) из зоны теплоподвода в зону теплоотвода за счет разности давлений;
- передача тепла в процессе конденсации паровой фазы в зоне теплоотвода и т.д.

Рассматривая тепловую трубу, как теплопередающий элемент энергетической системы, можно говорить о её собственном термическом сопротивлении R_{hp} . Согласно принципу действия и последовательности протекающих процессов, величина R_{hp} , без учета перетоков теплоты по корпусу, представляет собой сумму ряда термических сопротивлений: теплопроводности через стенку корпуса ТТ в зонах испарения и конденсации (R_u^{cm}, R_k^{cm}), теплообмена в зоне испарения ($R_{\text{и}}$), теплообмена в зоне конденсации ($R_{\text{к}}$), термического сопротивления в паровом канале ($R_{\text{п}}$).

$$R_{m.m} = R_u^{cm} + R_u + R_n + R_\kappa + R_\kappa^{cm} \quad (3.2.1)$$

или

$$\Delta T_{m.m} / Q = (\Delta T_u^{cm} + \Delta T_u + \Delta T_n + \Delta T_\kappa + \Delta T_\kappa^{cm}) / Q \quad (3.2.2)$$

Термические сопротивления R_u^{cm} и R_κ^{cm} определяются известными методами теории теплопроводности. Величина R_n , обусловленная перепадом давлений в паровом канале ТТ, рассчитывается на основании кривой упругости пара теплоносителя по гидродинамическому сопротивлению паровому потоку. Для криогенных и низкотемпературных ТТ величина R_n , как правило, пренебрежимо мала. Расчет термического сопротивления ТТ, таким образом, сводится к определению сопротивлений R_u и R_κ :

$$R_u = \frac{\Delta T_u}{Q} = \frac{1}{\alpha_u F_u}; \quad R_\kappa = \frac{\Delta T_\kappa}{Q} = \frac{1}{\alpha_\kappa F_\kappa}, \quad (3.2.3)$$

где ΔT_u , ΔT_κ — перепады температур между внутренней поверхностью корпуса ТТ в зонах испарения и конденсации и паром; α_u , α_κ — коэффициенты теплообмена в зонах испарения и конденсации в режиме нормального функционирования ТТ.

Теплообмен в зоне испарения ТТ характеризуется, как правило, наличием двух режимов: испарения и кипения. В испарительном режиме теплообмен осуществляется теплопроводностью через насыщенную жидкостью КС, а затем испарением жидкости с поверхности КС, обращенной в паровой объём.

Коэффициенты теплоотдачи α в зонах теплоподвода ТТ (кипения рабочей жидкости-тепло-носителя) определяют, ввиду сложности теоретических расчётов, экспериментальным путём.

На рисунке 3.2.1 представлена экспериментальная установка ИПМ, с помощью которой определены коэффициенты теплоотдачи при кипении жидкостей-теплоносителей, в условиях, характерных для работы тепловых труб.

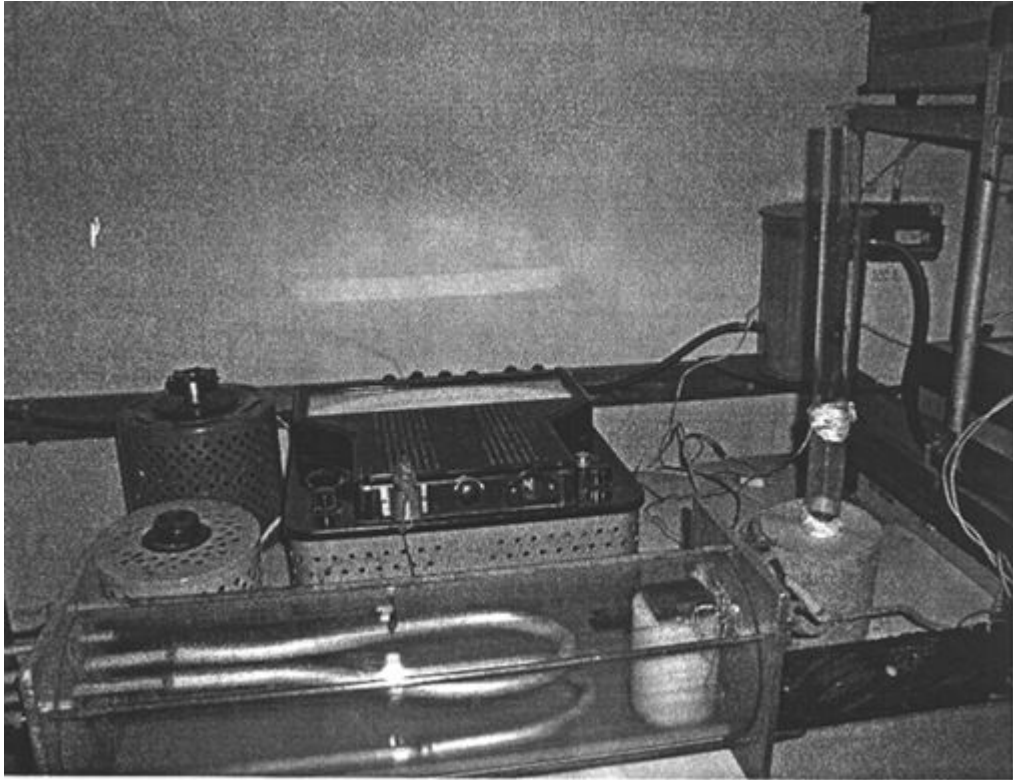


Рисунок 3.2.1 — Экспериментальная установка для исследований теплофизических процессов парообразования в условиях, характерных для работы зон нагрева тепловых труб

3.2.2 Расчеты максимальной теплопередающей способности тепловых труб

Для расчётов максимальной теплопередающей способности тепловых труб использована известная из литературы формула, учитывающая угол наклона ТТ относительно горизонта и, следовательно, влияние на Q_{\max} сил гравитации.

$$Q_{\max} = r \cdot [(4 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta / D_{\text{эф}}) - \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot L \cdot \sin \varphi] / L [(\mu_{\text{ж}} / K_{\text{кс}} \cdot F_{\text{кс}} \cdot \rho_{\text{ж}}) + (32 \cdot \mu_{\text{п}} / d_{\text{п}}^2 \cdot F_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}})]. \quad (3.2.4)$$

Необходимо отметить, что расчеты по формуле (3.2.4) корректны лишь при допущении о полном насыщении жидкостью капиллярной структуры ТТ. В реальных условиях функционирования ТТ (особенно, при наличии высокопористых КС) имеет место частичное осушение КС (в случае расположения зоны охлаждения выше зоны нагрева). При этом реальные значения Q_{\max} будут меньше расчётных, что необходимо учитывать при конструировании.

Для расчётов Q_{\max} по формуле (3.2.4) необходимо обладать сведениями о величинах коэффициентов проницаемости $K_{\text{КС}}$, которые для конкретных КС могут быть получены из экспериментов на соответствующих установках. В наших условиях такие данные получены в ходе экспериментов на гидродинамической установке ИПМ, входящей в состав экспериментальных стендов.

Значения величин, входящих в (3.2.4), изменялись в следующих диапазонах:

1. Жидкость-теплоноситель –	дистиллированная вода
2. Расчётный диапазон температур	$T = 80-120 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3. Диаметр пор (эффективный)	$D_{\text{эф}} = 10-65 \text{ мкм}$
4. Диаметр парового канала	$d_{\text{п}} = 4-8 \text{ мм}$
5. Теплота парообразования	$r = 2300-2200 \text{ кДж/кг}$
6. Плотность жидкости	$\rho_{\text{ж}} = 970-940 \text{ кг/м}^3$
7. Плотность пара	$\rho_{\text{п}} = 0,29-0,11 \text{ кг/м}^3$
8. Коэф-нт поверхн. натяжения	$\sigma = (62,5-55) \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$
9. Краевой угол смачивания	$\theta = 10-75 \text{ }^{\circ}$
10. Длина тепловой трубы	$L = 500 \text{ мм}$
11. Дин. коэф-нт вязкости ж-сти	$\mu_{\text{ж}} = (3510-2300) \cdot 10^{-7} \text{ Па}\cdot\text{с}$
12. Дин. коэф-нт вязкости пара	$\mu_{\text{п}} = (113-128) \cdot 10^{-7} \text{ Па}\cdot\text{с}$
13. Площадь сечения КС	$F_{\text{КС}} = (7-13,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
14. Площадь паров. канала	$F_{\text{п}} = (12,5-50) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
15. Коэф-нт проницаемости КС	$K_{\text{КС}} = (20-100) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$
16. Угол наклона ТТ	$\varphi = 0-90 \text{ }^{\circ}$.

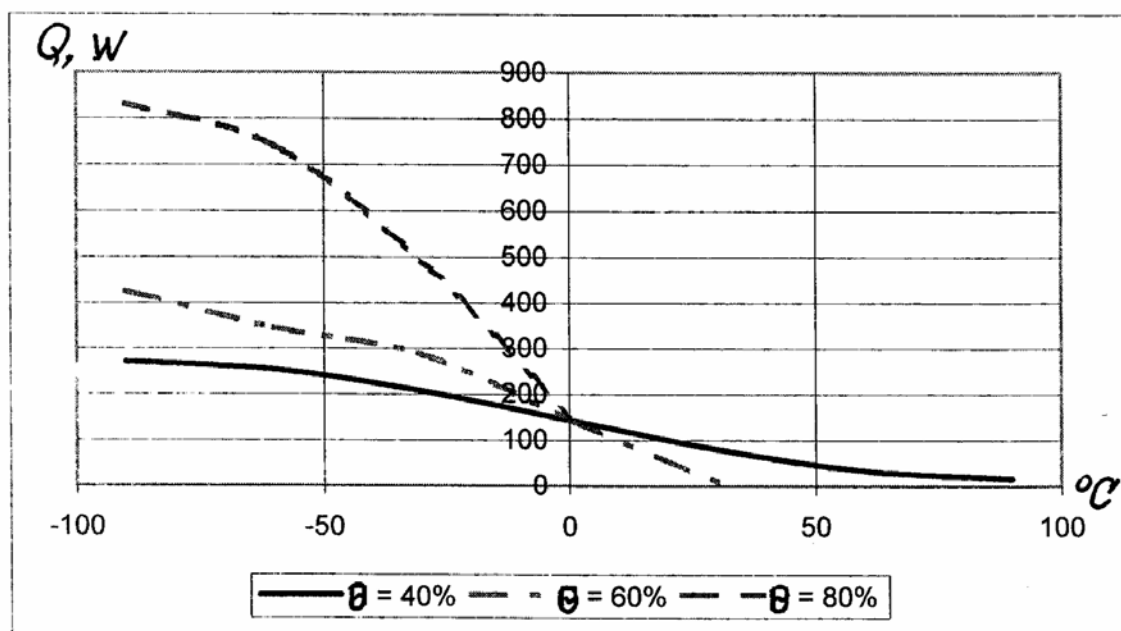
Результаты расчётов Q_{\max} по формуле (3.2.4) для опытных тепловых труб (КС – неокисленная нержавеющая сталь, температура – $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) сведены в таблицу 3.2.1.

Таблица 3.2.1

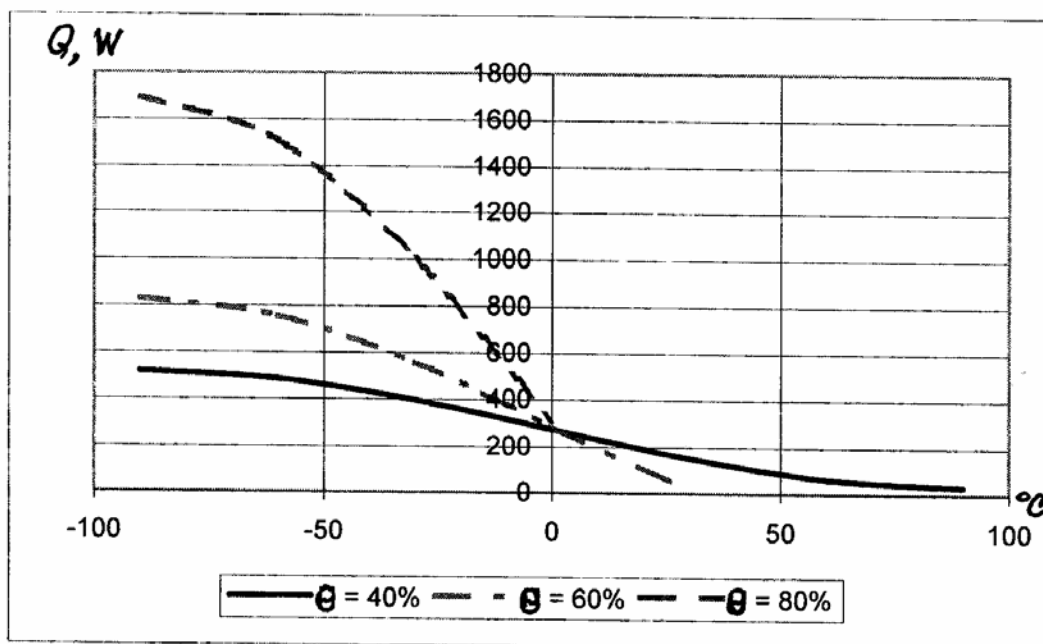
Результаты расчетов мощности, передаваемой тепловыми трубами с металлическими волокновыми КС, при различных значениях диаметра корпуса ТТ и изменении угла расположения ТТ относительно горизонта

Угол наклона ТТ, φ , град	$\delta_{cs} = 0,5 \text{ mm}$; пористость КС, Θ , %			$\delta_{cs} = 0,5 \text{ mm}$; пористость КС, Θ , %		
	40	60	80	40	60	80
	Мощность, передаваемая тепловой трубой, Q, W					
- 90	270	424	831	516	829	1694
- 60	253	345	740	484	756	1508
- 30	206	286	492	395	557	1003
0	143	146	153	273	285	312
+ 30	80	7		153	13	
+ 60	33			64		
+ 90	16			31		

На рисунке 3.2.1 представлены результаты расчётов зависимости максимальной теплопередающей способности тепловых труб в зависимости от их углов наклона относительно горизонта.



А



В

Рисунок 3.2.2 — Влияние угла наклона тепловых труб на их теплопередающую способность: А — наружный диаметр ТТ — \varnothing 6 мм; В — диаметр ТТ — \varnothing 10 мм; пористость МВКС: $\Theta = 40\%$, 60% , 80% — соответственно; толщина МВКС $\delta_{cs} = 0,5$ мм

3.2.3 Расчёты коэффициентов теплоотдачи в зонах нагрева тепловых труб

Как показали результаты экспериментальных исследований, интенсивность теплообмена при кипении зависит от ряда физических и геометрических характеристик капиллярно-пористых структур, в частности: 1) толщины КС δ_{kc} ; 2) теплопроводности КС λ_k ; 3) пористости КС Θ ; 4) эффективного (среднего) диаметра пор $D_{эф}$. В ИПМ выполнены исследования теплообмена при кипении на поверхностях с металловолокнистыми КС в условиях, характерных для работы тепловых труб, т.е. при капиллярном транспорте жидкости в зону её нагрева. Предложенная формула, обобщающая результаты исследований, имеет вид

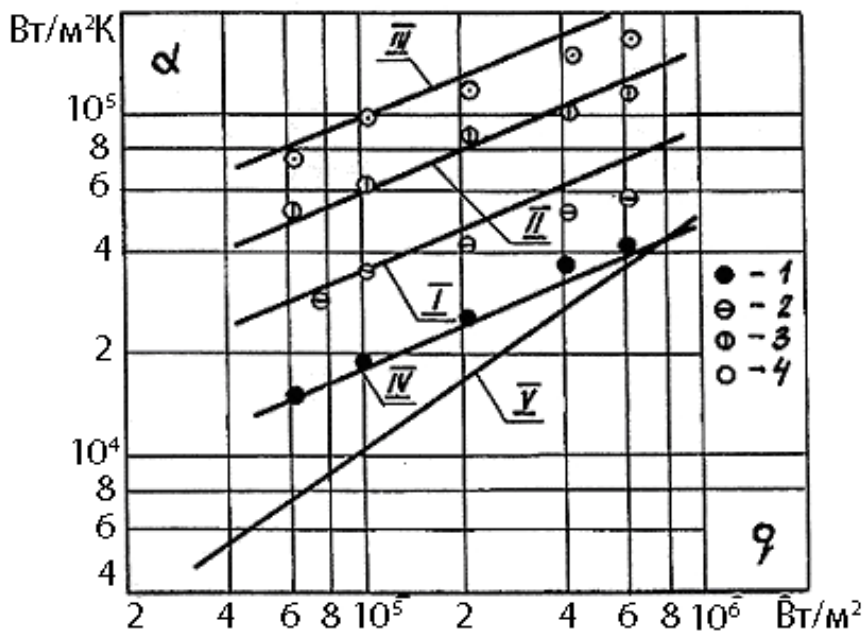
$$\alpha = c \cdot q^{0,6} \cdot \delta_{kc}^m \cdot \lambda_k^{0,25} \cdot (1 - \Theta_{max} / 1 - \Theta)^{0,15} \cdot D_{эф}^{0,1} \cdot (\lambda_{ж}^2 / \nu_{ж} \cdot \sigma \cdot T_{нас})^{0,333}, \quad (3.2.5)$$

где $c = 200$; $m = 0,65$ при $0,4 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{kc} \leq 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $c = 0,5$; $m = -0,2$ при $1,2 \cdot 10^{-3} < \delta_{kc} \leq 9,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Значения $\delta_{\text{КС}}$, $\lambda_{\text{к}}$, Θ , $D_{\text{эф}}$ определяют предварительно и подставляют в формулу (3.2.5) в безразмерном виде. Размерности указанных величин – в системе СИ. Толщина КС $\delta_{\text{КС}}$ задана при расчёте. Каркасная теплопроводность металлических волоконных КС определяется по формуле, приведенной в [2]; для этого необходимо знать теплопроводность исходных металлических волокон-фракций, их длину и диаметр. Значения пористости Θ и Θ_{max} являются заданными и расчётными величинами; они определяются по эмпирическим формулам, приведенным в [2]. Комплекс величин $(\lambda_{\text{ж}}^2 / \nu_{\text{ж}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{нас}})^{0,333}$, предложенный Д. Лабунцовым, учитывает влияние теплофизических свойств жидкости.

На рисунках 3.2.3 и 3.2.4 представлены результаты экспериментальных исследований интенсивности теплообмена при кипении дистиллированной воды на поверхностях с медными волоконными структурами в условиях капиллярного транспорта, при атмосферном давлении. Исследованы волоконные структуры средней и высокой пористости ($\Theta_1 = 40\%$; $\Theta_2 = 80\%$). Толщина этих структур изменялась в диапазоне $\delta_{\text{КС}} = 0,4 \dots 9,0$ мм; таким образом, экспериментами охвачен реальный диапазон изменения толщины и пористости металлических волоконных КС.

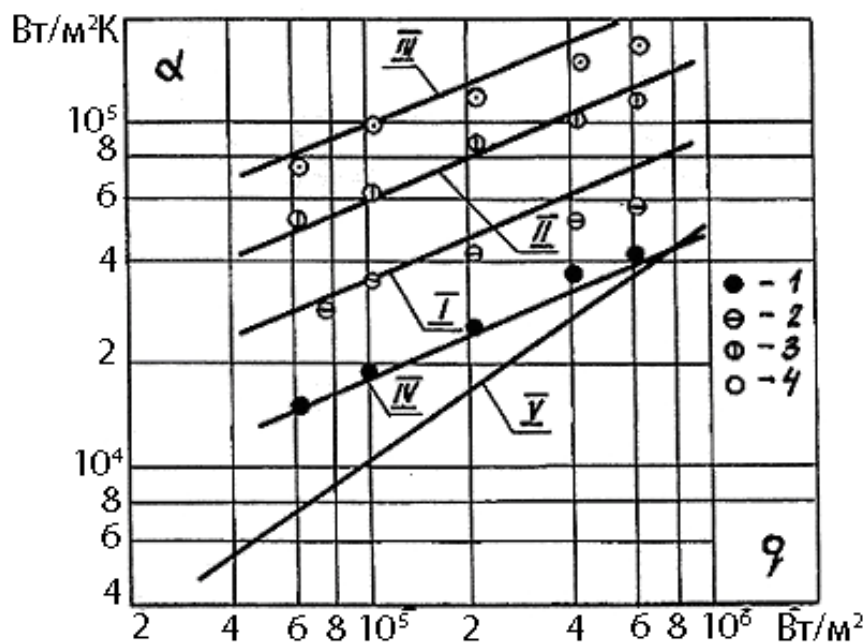
Кривые I–IV на рисунках 3.2.3 и 3.2.4 рассчитаны для значений толщин КС, указанных в подрисуночных подписях. Результаты сопоставления экспериментальных данных (точки 1-4) и расчётов (кривые I–IV) на рис. 3.2.3 и 3.2.4 свидетельствуют об удовлетворительной точности предложенной эмпирической формулы (3.2.5). Разброс экспериментальных точек значений $\alpha = f(q)$ не превышает $\pm 20\%$, что для исследований кипения является приемлемым.



Пористость $\Theta = 40\%$;
 толщина КС: 1 - $\delta_{\text{КС}} = 0,2$
 мм; 2 - $\delta_{\text{КС}} = 0,4$ мм; 3 - $\delta_{\text{КС}}$
 $= 0,8$ мм; 4 - $\delta_{\text{КС}} = 4,0$ мм

Кривые I-IV — расчёт для
 приведенных толщин
 МВКС соответственно; —
 расчёт для кипения воды
 на гладкой технической
 поверхности

Рисунок 3.2.3 — Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчётов коэффициентов теплоотдачи (по формуле (3.2.5) при кипении воды на поверхностях с металлическими волоконными капиллярными структурами средней пористости в условиях капиллярного транспорта жидкости (режим ТТ).



Толщина КС $\delta_{\text{КС}} = 0,8$ мм;
 Пористость КС: 1 - $\Theta =$
 40% ; 2 - $\Theta = 70\%$; 3 - $\Theta =$
 84% . Кривые I-IV —
 расчёт для указанных
 величин пористости,
 соответственно; V —
 расчёт для кипения воды
 на гладкой технической
 поверхности

Рисунок 3.2.4 — Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчётов коэффициентов теплоотдачи (по формуле (3.2.5) при кипении воды на поверхностях с металловолоконными капиллярными структурами высокой пористости в условиях капиллярного транспорта жидкости (режим ТТ).

ВЫВОДЫ

1. Волокновые КС обеспечивают лучшие гидродинамические характеристики по сравнению со слоистыми волокновыми и каркасными волокново-порошковыми КС (при равной пористости они обладают коэффициентами проницаемости в 2,3-2,5 раза выше). Такие результаты можно объяснить тем, что максимально возможная пористость материалов из порошков не превышает 60% (без использования специальных технологий получения высоких пористостей), тогда как в материалах из волокон легко достигается пористость 80-85%.
2. Волокново-порошковые КС уступают по проницаемости волокновым КС, поскольку имеют поры в 1,8-2,5 раза меньшего размера, что обеспечивает их более высокие транспортные способности. При этом комбинированные КС, изготовленные из волокон с диаметром 50 мкм и порошка с дисперсностью 80-100 мкм, обладают лучшим сочетанием проницаемости и размеров пор в сравнении с волокном новым материалом, заполненным частицами порошка меньшего размера.
3. В результате проведенных исследований выбраны следующие параметры для опытной партии тепловых труб: длина ТТ – 0,5 м; материал корпуса и капиллярных структур – нержавеющая сталь и медь; пористость капиллярной структуры: $\Theta = 60...90\%$; толщина КС – 0,5-1,0 мм; жидкости-теплоносители – дистиллированная вода и этанол.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косторнов А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых материалов и сплавов. – Киев, Наукова думка, 2003. – Т.2, 550 с.
2. Косторнов А.Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. – Киев: Техника, 1983. – 128 с.