

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

КУЛАКОВ А. Г.

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

Интенсификация теплоэнергетических, холодильных и промышленных процессов и технологий, стремительное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности привели к тому, что в настоящее время имеет место повышение плотностей теплового потока. Постоянно появляются новые области применения теплообменного оборудования, расширяется диапазон изменения температурных и режимных параметров. Существует тенденция к повышению компактности оборудования, оптимизации его массогабаритных характеристик. В связи с этим актуальной является задача разработки и внедрения современных технических решений и конструкций испарительно-конденсационных устройств (испарителей, конденсаторов, тепловых труб), в том числе для двухфазных систем обеспечения теплового режима, с использованием интенсификации тепло- и массообмена, а также получения надежных методик для расчета таких систем.

Исследование свойств капиллярных структур, применяемых в испарительно-конденсационных устройствах. Капиллярная структура (КС) – ключевой элемент испарительно-конденсационного оборудования, от которого в значительной степени зависят его характеристики и возможности интенсификации теплообмена. Однако в настоящее время для капиллярно-пористых структур (КПС) из спеченного металлического порошка отсутствуют надежные систематизированные экспериментальные данные по их свойствам. Поэтому было проведено комплексное исследование и определены капиллярно-транспортные характеристики КПС из спеченного порошка с частицами дендритной и округлой форм (для фракций с размерами частиц до 315 мкм), нашедших наиболее широкое применение в тепловых трубах и испарительно-конденсационных устройствах.

Получены данные по пористости, проницаемости, размерам пор, коэффициенту извилистости КПС и соответствующие аппроксимирующие зависимости.

Данные по размерам пор приведены в табл. 1, где d_s – средневзвешенный размер частиц во фракции, определяемый по формуле Андерсона:

$$d_s = d_{s, \min} d_{s, \max} \sqrt{\frac{2}{d_{s, \min}^2 + d_{s, \max}^2}};$$

где $d_{s, \min}$, $d_{s, \max}$ – минимальный и максимальный размер частиц во фракции; d_{ch} – характеристический размер пор, свидетельствующий о капиллярном потенциале КПС тепловых труб; d_m – средний размер пор; $d_{\max}$ – максимальный размер пор, определяющий капиллярный потенциал КПС в испарителях и конденсаторах с капиллярным затвором.

Таблица 1

Экспериментальные данные по эффективным размерам пор

Частицы округлой формы	Частицы дендритной формы	
	$d_s < 120$ мкм	$d_s \geq 120$ мкм
$d_{\max} = 5,47 \cdot 10^{-3} d_s^{0,528}$	$d_{\max} = 3,09 \cdot 10^{-3} d_s^{0,438}$	$d_{\max} = 0,132 d_s^{0,85}$
$d_{ch} = 5,5 \cdot 10^{-3} d_s^{0,539}$	$d_{ch} = 2,31 \cdot 10^{-3} d_s^{0,42}$	$d_{ch} = 0,116 d_s^{0,85}$
$d_m = 8,85 \cdot 10^{-3} d_s^{0,61}$	$d_m = 6,7 \cdot 10^{-4} d_s^{0,315}$	$d_m = 0,315 d_s^{0,996}$

Экспериментальные данные по проницаемости аппроксимируются следующими зависимостями:

- для КПС из порошка с частицами округлой формы $K = 3,115 \cdot 10^{-6} d_s^{1,374}$;
- для КПС из порошка с частицами дендритной формы $K = 6,772 \times 10^{-8} d_s^{0,888}$, при $d_s < 120$ мкм; $K = 2,1 \cdot 10^{-4} d_s^{1,777}$, при $d_s \geq 120$ мкм.

Среднее значение коэффициента извилистости КПС – 1,3. Пористость образцов с частицами дендритной формы – 65 %, округлой – 55 %.

Свойства нерегулярных КПС. Важная особенность порошковой КПС – зависимость ее свойств от толщины, которая характеризуется коэффициентом регулярности пористой структуры: $C = d_r/d_{ir}$, где d_r – диаметр пор регулярной структуры; d_{ir} – диаметр пор нерегулярной структуры.

КПС в обычных тепловых трубах (ТТ) и испарительно-конденсационных устройствах часто, а в миниатюрных тепловых трубах (МТТ) практически всегда являются нерегулярными. При расчете капиллярно-транспортных характеристик следует учитывать степень нерегулярности. Поэтому было выполнено специальное исследование свойств нерегулярных структур.

Полученные экспериментальные данные обобщены (табл. 2) путем нахождения эмпирических коэффициентов зависимости коэффициента регулярности от толщины слоя: $C = d_r/d_{ir} = (n/n_r)^\gamma$, где $n = \delta_w/d_s$ – число частиц по толщине слоя; δ_w – толщина КПС; d_s – размер частиц порошка [1]. Тогда диаметр пор нерегулярной структуры определяется по формуле: $d_{ir} = d_r(n_r/n)^\gamma$, где γ – эмпирический показатель степени. Пористость нерегулярной структуры рассчитывается: $\varepsilon_{ir} = \varepsilon_r(n_{re}/n)^{\gamma_{\varepsilon}}$ или $\varepsilon_{ir} = \varepsilon \left(\frac{n_{re}}{\delta/d_s} \right)^{\gamma(\varepsilon)}$, средний

диаметр пор нерегулярной структуры: $d_{ir,m} = d_m \left(\frac{n_r}{\delta/d_s} \right)^{\gamma(m)}$, а проницаемость: $K = \frac{d_{ir,m}^2 \varepsilon_{ir}}{b}$, где b – коэффициент, полученный по зависимостям проницаемости от размеров частиц.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты для расчета нерегулярных КПС

	d_m	$d_{\max}, d_{ch}$		ε
КПС из порошка с частицами округлой формы				
γ	0,282		$\gamma(\varepsilon)$	0,282
n_r	18	24	n_{re}	6
КПС из порошка с частицами дендритной формы				
γ	0,15		$\gamma(\varepsilon)$	0,11
n_r	24		n_{re}	6

Интенсификация теплообмена в испарительных теплообменниках.

На рис. 1 представлена принципиальная схема элемента испарителя с капиллярным затвором, работающим по принципу «перевернутого мениска». Движение жидкого теплоносителя осуществляется в КПС 1, прижатой к обогреваемой стенке 2 перпендикулярно к ней навстречу тепловому потоку. В КПС (или стенке) выполнена система каналов для движения пара 3, сообщающаяся с паровым коллектором. Мениск пропитывающей КПС жидкости направлен, в отличие от обычных испарителей тепловых труб, вогнутой частью в сторону стенки.

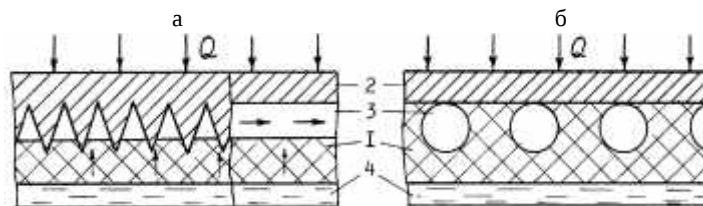


Рис. 1. Принципиальная схема элемента испарителя с капиллярным затвором (два варианта конструктивного исполнения): 1 – капиллярно-пористая структура; 2 – обогреваемая стенка; 3 – каналы для пара; 4 – каналы (артерия) для жидкости

Рост коэффициентов теплоотдачи в испарителях такой конструкции обусловлен приближением поверхности испарения к обогреваемой стенке.

Качество посадки пористого фитиля в корпус испарителя в значительной степени определяет эффективность работы испарителей с капиллярным затвором. В настоящее время, как правило, используется способ механической посадки КПС из титана, никеля и нержавеющей стали в корпус испарителя или ее прижатие к стенке. В экспериментальном испарителе применено припекание фитиля к обогреваемой пластине, что обеспечивает меньшее термическое сопротивление контакта стенка – фитиль. Для минимизации массы и возможности применения различных низкотемпературных теплоносителей использованы алюминиевые КПС и корпус испарителя. При спекании алюминиевой КПС применена разработанная в ФТИ НАН Беларуси технология, исключая стадию предварительного прессования, что позволяет повысить проницаемость структуры [2]. Дополнительное улучшение параметров испарителя достигается за счет применения напорной подачи теплоносителя.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от подводимого теплового потока в испарителе ТТ1 (рис. 1а) с алюминиевой капиллярно-пористой структурой проницаемостью $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, пористостью 40 % и средним диаметром пор 15 мкм. Теплоносителем являлся ацетон. В исследованном диапазоне плотностей теплового потока получены достаточно высокие коэффициенты теплоотдачи. Причем максимум теплопере-

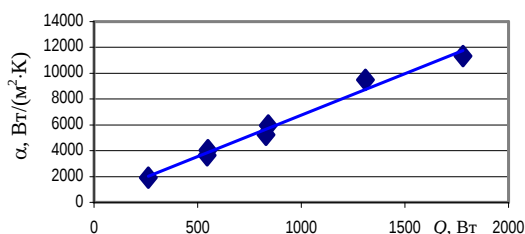


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от подводимого теплового потока

носа не был достигнут из-за технических ограничений экспериментальной установки. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимирована функцией: $\alpha = 1027,4q^{0,9537}$, где q – плотность теплового потока.

Интенсификация теплообмена в конденсационных теплообменниках. Одним из эффективных способов уменьшения термического сопротивления при конденсации является уменьшение толщины пленки конденсата путем его отсоса от теплообменной поверхности с помощью капиллярных структур. Были исследованы закономерности протекания процессов тепло- и массообмена при пленочной конденсации пара в условиях интенсифицирующего воздействия поверхностных сил, создаваемых капиллярно-пористыми структурами под действием перепада давления между фазами.

Получены экспериментальные данные по теплоотдаче при пленочной конденсации пара на развитой поверхности с нарезками и капиллярными щелями (рис. 3) и в капиллярных каналах с пористой границей.

Размеры конденсатора с капиллярными нарезками ТК-1 (рис. 3): длина оребренной поверхности 2 – 60 мм, наружный диаметр несущей трубы 4 – 16 мм, количество паровых каналов 1 – 12, шаг нарезки – 0,8 мм, высота – $h = 0,5$ мм, ширина зазора в щели, с учетом вставленной в нее гофрированной пластинки 3 – 0,05 мм, диаметр жидкостной артерии 5 – 1 мм.

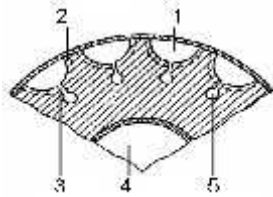


Рис. 3. Схема сечения конденсатора с нарезками и капиллярными щелями

Полученный в экспериментах коэффициент теплоотдачи в этом конденсаторе находится в диапазоне 50000...70000 Вт/(м²·К). Экспериментальные данные обобщены с помощью преобразования [3] аналитической зависимости коэффициентов теплоотдачи при испарении и конденсации на резбовидных поверхностях

$$Nu^* = \alpha h \sqrt{\frac{\sin \Theta \operatorname{tg} \varphi}{\lambda_w \lambda_l}} = 1 \quad (1)$$

к следующему виду:

$$Nu^* = \frac{\alpha h}{f_F} \sqrt{\frac{\sin \phi \operatorname{tg} \varphi}{\lambda_w \lambda_l}} = 1, \quad (2)$$

где Nu^* – модифицированное число Нуссельта; f_F – коэффициент, учитывающий форму развитой поверхности с капиллярными нарезками; $\sin \phi$ – эмпирический коэффициент, имеющий физический смысл среднего значения синуса угла при вершине треугольной нарезки и учитывающий гидродинамику движения пленки конденсата в нарезке. В оценочных расчетах можно принимать $\sin \phi = \sin \Theta$. Коэффициент $f_F = F/F_d$, где F – площадь поверхности основания нарезок; F_d – площадь несущей поверхности.

Расчеты по (2) выполнялись для средней температуры пара 29 °С. При этом использовался эмпирический коэффициент $\sin \phi = 0,16$, который соот-

ветствует углу $\phi = 9,3^\circ$. Сопоставление результатов экспериментов с расчетом по уравнению (2) дано на рис. 4. Экспериментальные данные с погрешностью не более $\pm 20\%$ обобщаются предложенной зависимостью.

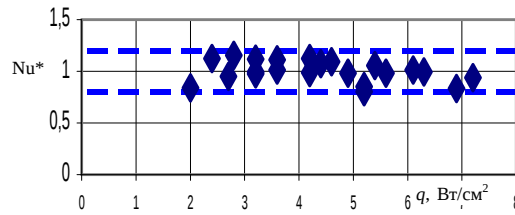


Рис. 4

Специальная серия экспериментов проводилась по определению влияния паросодержания подаваемого на вход конденсатора теплоносителя на интенсивность теплоотдачи. Полученное в экспериментах изменение коэффициентов теплоотдачи при изменении паросодержания в диапазоне 0,6...1 не выходило за пределы разброса экспериментальных данных.

Для изучения закономерностей процессов теплообмена при конденсации в капиллярных каналах с пористой границей создана конструкция конденсатора с пористой пластиной, работающего при сравнительно высоких плотностях теплового потока (рис. 5). Его основными элементами являются паровые каналы, поверхность конденсации с капиллярными нарезками и пластина из пористого алюминия, установленная на этой поверхности. Жидкая фаза фильтруется через капиллярно-пористую пластину под действием избыточного давления в паре и капиллярных сил.

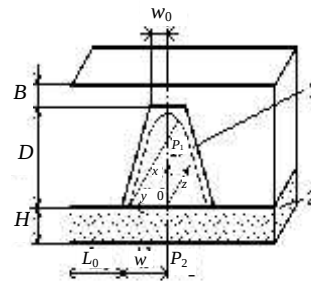


Рис. 5. Схема конденсатора с пористой пластиной: 1 – пленка конденсата в паровом канале; 2 – капиллярно-пористая пластина

Конструктивные характеристики конденсатора: использовалась алюминиевая капиллярно-пористая структура с проницаемостью $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, пористостью 40 % и средним диаметром пор 15 мкм, толщиной 9 мм; параметры капиллярной поверхности – капиллярные каналы – имели прямоугольную форму, полуширина канавки – 0,2 мм, высота – 1 мм, шаг резьбы – 1 мм, площадь теплообмена – 0,01 м².

Коэффициент теплопередачи, приведенный к несущей поверхности у основания паровых канавок, определялся при непосредственном измерении температуры охлаждаемой стенки несколькими термодарами: $\alpha = (\Delta t/q - \delta/\lambda)^{-1}$.

Экспериментально получена зависимость коэффициента теплопередачи от плотности теплового потока, характерной особенностью которой являются наличие максимума при плотностях теплового потока 6...9 Вт/см² и плато с незначительным снижением величины коэффициента теплопередачи с увеличением тепловой нагрузки (рис. 6).

Экспериментальные данные, полученные на ацетоне в качестве теплоносителя, свидетельствуют о высокой интенсивности теплопередачи в конденсаторе с пористой пластиной. Они обобщены в критериальной форме зависимостью $Nu = CRe^n$ с погрешностью не более 20 % с соответствующей

щими коэффициентами для двух характерных областей: для $Re < 0,2$, $Nu = 889,59Re^{1,0068}$, для $Re > 0,2$ $Nu = 147,98Re^{-0,1452}$.

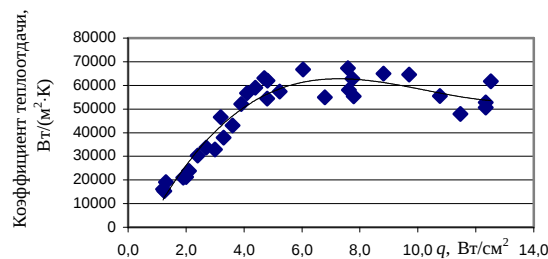


Рис. 6. Влияние плотности теплового потока на теплоотдачу при конденсации в капиллярных каналах с пористой границей

Критерий Рейнольдса Re , отнесенный к смоченному периметру оребрения, определялся по формуле $Re = \frac{Q(s/2)}{A_b h_{fg} \mu}$, где s – шаг капиллярного оребрения, критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \left(\frac{s}{2} \right)}{\lambda_l}.$$

Интенсификация теплообмена в тепловых трубах связана с оптимизированием массогабаритных характеристик, применением ТТ малого поперечного сечения, так называемых миниатюрных тепловых труб. Термин «миниатюрная тепловая труба», как правило, применяется для тепловых труб, цилиндрических или плоских, имеющих соответственно диаметр или толщину от 1 до 6 мм, т. е. плоская тепловая труба «больших» размеров часто является «миниатюрной» с точки зрения гидродинамики и теплообмена.

Экспериментально исследовались плоские и с круглым поперечным сечением миниатюрные тепловые трубы «медь – вода» с тремя типами капиллярных структур: порошковой, сеточной и образованной пучком тонких проволок.

Установлено, что ограничение теплопереноса у тепловых труб с капиллярными структурами из металлического порошка во всем исследованном диапазоне определяется капиллярными ограничениями. Для МТТ с сеточной и проволочной КС кризис теплопереноса обусловлен капиллярными ограничениями и связан с взаимодействием потоков фаз теплоносителя и блокированием парового канала жидкой фазой. В процессе обобщения экспериментальных данных по этому пределу теплопереноса равенство критерия Вебера полагалось единице при достижении кризиса теплопереноса: $We = \frac{\rho_v v_v^2 A_{ch}}{\sigma} = 1$, где A_{ch} – характеристическая длина волны.

Для МТТ с КПС проволочного и сеточного типов определены характеристическая длина волны A_{ch} и ее зависимость от капиллярного размера

КПС r_{ent} : $A_{ch} = r_{ent} a_{ent}$, где a_{ent} – эмпирический коэффициент. Для сеточной структуры характеристическая длина волны A_{ch} зависит от температуры: $A_{ch} = 1,32415t^{-1,41228}$; $a_{ent} = 5767,6t^{-1,3065}$. Для проволочной КПС экспериментальные данные аппроксимированы постоянными: $A_{ch} = 0,00295$; $a_{ent} = 22,18$.

Исследовано влияние плотности теплового потока на интенсивность теплоотдачи в зонах испарения и конденсации в зависимости от температуры и угла наклона МТТ к горизонту. Непосредственно из полученных экспериментальных данных определены величины эффективной теплопроводности тонких нерегулярных КПС в зоне испарения $k_{eff,exp}$. Установлено, что применение в МТТ таких структур приводит к повышению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с рассчитанными по их теплопроводности и толщине.

Изучены нестационарные процессы в МТТ. Получены постоянные времени (которые составляют 20...30 с) для динамических режимов работы МТТ, необходимые при проектировании систем обеспечения теплового режима (СОТР) с использованием объектов с быстроизменяющимся импульсным тепловыделением.

Экспериментально установлено, что величина максимума теплопереноса в МТТ не зависит от вида процесса, который к нему приводит, а определяется рабочей температурой, мощностью и углом наклона МТТ, т. е. текущим термодинамическим состоянием МТТ.

Исследовано влияние осушения испарителя, вызванного ограничениями теплопереноса на последующее изменение характеристик МТТ. Особенность миниатюрных тепловых труб с сеткой и проволочным жгутом – неполная воспроизводимость параметров МТТ после осушения испарителя (кризиса теплоотдачи) и снятия нагрузки. Этот эффект проявляется в долговременном изменении (ухудшении параметров) МТТ и связан с длительностью процесса полного насыщения теплоносителем осушенной КПС, обусловленной состоянием поверхности КПС, в частности краевым углом смачивания.

Серийно выпускаемые МТТ с разными типами капиллярных структур имеют разную технологию изготовления и очистки поверхности КПС, следствием чего является различие в свойствах поверхности КПС, в степени поверхностной активации и прежде всего значении краевого угла смачивания. МТТ со спеченным порошком после спекания при высоких температурах гарантированно очищается от адсорбированных примесей и имеет небольшое значение краевого угла смачивания. Для восстановления насыщенности КПС и работоспособности МТТ требуется определенный временной интервал – в начале эксплуатации МТТ от десятков до нескольких часов и постепенно уменьшающийся за время работы МТТ (через сотни часов эксплуатации). Он зависит от температурного уровня и режимного состояния МТТ. Это явление следует учитывать при проектировании СОТР, прежде всего мобильного назначения и аппаратуры, для которой характерны пиковые режимы работы.

ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование и определены капиллярно-транспортные характеристики КПС, в том числе тонких, нерегулярных, из спеченного порошка с частицами разных фракций дендритной и округлой форм. Получены эмпирические коэффициенты и зависимости для расчета этих характеристик с учетом формы частиц порошка и степени регулярности.

2. Предложено конструктивное решение для интенсификации теплообмена в испарительных теплообменниках, которая обеспечивается применением схемы с «перевернутым мениском», использованием КПС с высокими теплопроводностью и проницаемостью, обеспечением хорошего контакта КПС с теплообменной стенкой и напорной схемой организации подачи теплоносителя и подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями интенсивности теплообмена.

3. Полученные экспериментальные данные по теплоотдаче при пленочной конденсации пара на развитой поверхности с нарезками и капиллярными щелями и в капиллярных каналах с пористой границей обобщены в критериальной форме с погрешностью не более $\pm 20\%$.

4. Для миниатюрных тепловых труб с фитилем из спеченного порошка максимальная передаваемая тепловой трубой мощность определяется капиллярными ограничениями во всем исследованном диапазоне ($30 \dots 100^\circ\text{C}$). Для МТТ с проволочным и сеточным фитилями, кроме капиллярного ограничения, при горизонтальной ориентации проявляется ограничение теплопереноса, связанное с взаимодействием потоков жидкости и пара, вызывающим блокирование парового канала жидкостной фазой теплоносителя.

5. Экспериментально установлено, что в МТТ за счет применения тонких нерегулярных КПС достигается существенная (до $2 \dots 10$ раз) интенсификация теплообмена.

6. Изучены нестационарные процессы в МТТ, связанные с динамическим изменением режима работы, и процессы изменения характеристик МТТ после осушения испарителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р е г у л я р н о с т ь структуры пористых материалов из порошка бронзы / Р. П. Тодоров, В. П. Георгиев, П. А. Витязь и др. // Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 31–33.
2. К о ш к и н Ю. Б., К у л а к о в А. Г. Капиллярный затвор из пористого алюминия в тепловых трубах с раздельными каналами для пара и жидкости // Тепловые трубы и теплообменники: От науки к практике. – Мн., 1990.
3. Ш е к р и л а д з е И. Г., Р у с и ш в и л и Д. Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи в процессах испарения и конденсации на капиллярных поверхностях // ИФЖ. – 1980. – № 5. – С. 393–399.

Представлена заседанием
научного семинара
лаборатории пористых сред

Поступила 20.01.2005