

Из схемы рис. 4 запишем уравнения для управляемых источников тока и напряжения:

$$i_{нт} = D_1 i_L; \quad (15)$$

$$u_{ин} = D_1 \frac{R}{R + R_c} u_c. \quad (16)$$

Разработанный подход применим также для получения моделей СПМ иных типов (рис. 1). Ограничением предложенного подхода является непрерывность тока нагрузки.

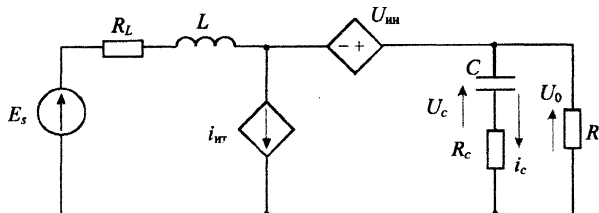


Рис. 4. Модель СПМ с учетом сопротивлений дросселя и конденсатора

Полученные модели использованы при синтезе замкнутых систем управления СПМ и исследовании [6] их динамики.

ВЫВОД

Математическое описание ШИМ-ключа в осредненных значениях переменных позволяет получить линейную модель импульсных преобразователей постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русан В. И., Короткевич М. А. Комплексное использование возобновляемых источников энергии. – Мн.: Институт энергетики АПК НАН Беларуси, 2004. – 68 с.
2. Русан В. И., Фуад Х. А. Комбинированное использование возобновляемых источников энергии // Аграрная энергетика в XXI веке: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Мн., 2001. – С. 56–57.
3. Абдул Мажид Аль-Хатиб, Эль-Саббаг Маруан И., Петренко Ю. Н. Микропроцессорная система обеспечения максимальной выходной мощности солнечной батареи // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления: Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Махнача, Е. В. Владимирова. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – С. 234–239.
4. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
5. Мелешин В. И. Получение непрерывной линейной модели силовой части импульсного преобразователя как начальный этап проектирования его динамических свойств // Электричество. – 2002. – № 10. – С. 39–43.
6. Абдул Мажид Аль-Хатиб, Куликов М. А., Петренко Ю. Н. Математическое моделирование силовых интерфейсных модулей солнечных батарей // Современные технологии последиplomного образования: Проблемы и перспективы: Материалы Республ. науч.-метод. конф. (Минск, 25–26 марта 2004 г.) / Под ред. М. М. Болбаса, Л. К. Волошина, Э. Я. Ивашина и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 117–119.

УДК 536.248

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Докт. техн. наук, проф. ВАСИЛЬЕВ Л. Л., КУЛАКОВ А. Г.

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

Для организации высокоэффективной теплопередачи на значительное расстояние, создания эффективных и компактных теплообменных устройств для теплоэнергетики, холодильной техники, химической промышленности, систем обеспечения теплового режима (СОТР) успешно используются испарительно-конденсационные устройства: испарители, конденсаторы, тепловые трубы. В условиях существующей в настоящее время тенденции оптимизации массогабаритных характеристик, увеличения интенсивности теплообмена и повышения удельных плотностей тепловыделения актуальной задачей становится поиск путей интенсификации процессов испарения и конденсации.

Предложено конструктивное решение для интенсификации теплообмена в испарительных теплообменниках, которая обеспечивается применением схемы с «перевернутым мениском» (рис. 1), использованием капиллярно-пористых структур (КПС) с высокой теплопроводностью и проницаемостью, обеспечением хорошего контакта КПС с теплообменной стенкой и напорной схемой организации подачи теплоносителя и подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями интенсивности теплообмена. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимирована следующей функцией: $\alpha = 1027,4q^{0,9537}$, где α – коэффициент теплоотдачи; q – плотность теплового потока.

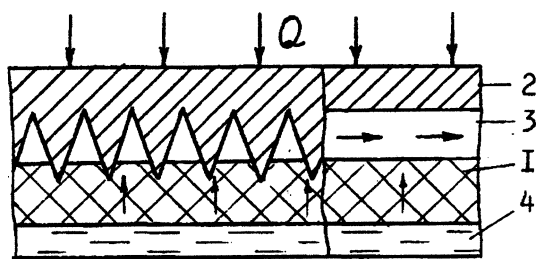


Рис. 1. Принципиальная схема элемента испарителя с капиллярным затвором: 1 – КПС; 2 – обогреваемая стенка; 3 – каналы для пара; 4 – каналы (артерия) для жидкости

Одним из эффективных способов снижения термического сопротивления при конденсации является уменьшение толщины пленки конденсата путем его отсоса от теплообменной поверхности с помощью капиллярных структур. Этот способ реализован в конденсационном теплообменнике с нарезками на развитой поверхности и капиллярными щелями (рис. 2).

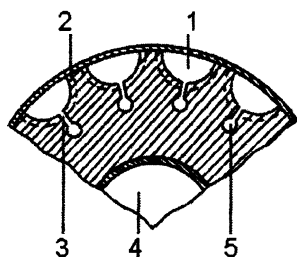


Рис. 2. Схема сечения конденсатора с нарезками и капиллярными щелями: 1 – паровой канал; 2 – нарезка; 3 – щель; 4 – несущая труба; 5 – артерия

Коэффициент теплоотдачи в этом конденсаторе находится в диапазоне $(5...7) \cdot 10^4$ Вт/(м²·К). Экспериментальные данные с погрешностью 20 % обобщены с помощью преобразования [1] аналитической зависимости коэффициента теплоотдачи при испарении и конденсации на резбовидных поверхностях

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

к следующему виду:

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

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

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. 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.

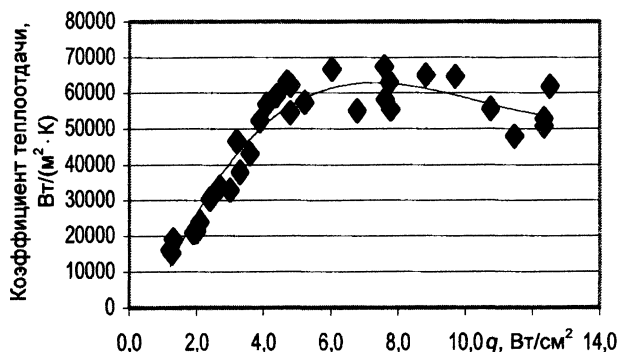


Рис. 3. Влияние плотности теплового потока на теплоотдачу при конденсации в капиллярных каналах с пористой границей

Полученные экспериментальные данные обобщены в критериальной форме зависимостью $Nu = CRe^n$ с погрешностью не более 20 % с соответствующими коэффициентами для двух характерных областей: для $Re < 0,2$; $Nu = 889,59Re^{1,0068}$; для $Re > 0,2$; $Nu = 147,98Re^{-0,1452}$. Критерий Рейнольдса Re определялся по скорости пленки, отнесенной к смоченному периметру обрешетки.

Конденсаторы с капиллярно-пористым элементом можно рекомендовать для применения в качестве как конденсатора, так и реверсивного теплообменника: конденсатор-испаритель.

Проведено комплексное экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена в плоских и с круглым поперечным сечением миниатюрных тепловых трубах (МТТ) «медь – вода» с тремя типами капиллярных структур: порошковой, сеточной и образованной пучком тонких проволок в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров.

Установлено, что для МТТ с фитилем из спеченного порошка максимальная передаваемая

мая тепловой трубой мощность определяется капиллярными ограничениями во всем исследованном диапазоне (30...100 °С). Для МТТ с проволочным и сеточным фитилями кроме капиллярного ограничения при горизонтальной ориентации проявляется ограничение теплопереноса, связанное с взаимодействием потоков жидкости и пара, которая вызывает блокирование парового канала жидкостной фазой теплоносителя. При обобщении экспериментальных данных, связанных с этим ограничением, полагалось равенство критерия Вебера единице при достижении кризиса теплопереноса

$$We = \frac{\rho_v v_v^2 A_{ch}}{\sigma} = 1,$$

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

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

Изучены нестационарные процессы в миниатюрных тепловых трубах, связанные с динамическим изменением режима работы. Найденные постоянные времени МТТ составляют 20...30 с.

Обнаружена особенность миниатюрных тепловых труб с сеткой и проволочным жгутом – неполная воспроизводимость параметров после осушения испарителя (кризиса теплоотдачи) и снятия нагрузки, связанная с влиянием краевого угла смачивания на динамический процесс капиллярного впитывания в зоне испарения после осушения КПС, вызванного кризисом теплопереноса.

Предложены практические методы повышения эффективности МТТ и выполнена оптимизация цилиндрической миниатюрной тепловой трубы с порошковой КС по пределу теплопереноса. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о сохранении высокой теплопередающей способности (выше 20 Вт), разработанной МТТ со спеченной капиллярной структурой и при отрицательных углах наклона (рис. 4).

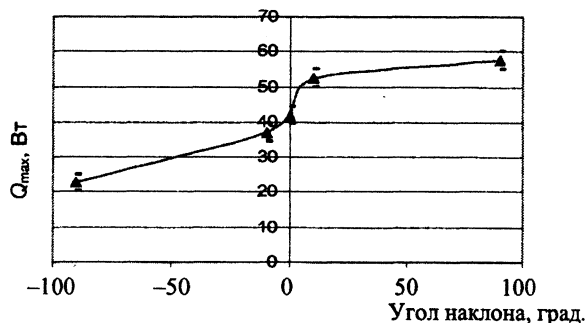


Рис. 4. Зависимость Q_{max} от угла наклона для оптимизированной МТТ

Было проведено комплексное исследование и определены капиллярно-транспортные характеристики капиллярно-пористых структур, в том числе тонких, нерегулярных, из спеченного порошка с частицами разных фракций дендритной и округлой форм, нашедших наиболее широкое применение в тепловых трубах и испарительно-конденсационных устройствах. Получены эмпирические коэффициенты и зависимости для расчета этих характеристик с учетом формы частиц порошка.

Следующие зависимости предложены для расчета среднего размера пор: для КПС из порошка с частицами округлой формы – $d_m = 2,1648d_s^{0,5851}$, для дендритной формы – $d_m = 8,0904d_s^{0,3322}$ при $d_s < 120$ мкм; $d_m = 0,3003d_s^{1,0159}$ при $d_s \geq 120$ мкм, где d_s – средневзвешенный размер частиц во фракции, мкм.

ВЫВОД

Исследованы свойства тонких нерегулярных порошковых структур. Получены эмпирические коэффициенты n_r , n_{re} , γ и $\gamma(\epsilon)$ для расчета капиллярно-транспортных характеристик тонких нерегулярных порошковых КПС с учетом формы частиц порошка по формулам: диаметр пор $d_{ir} = d_r(n_r/n)^{\gamma}$ [2], пористость $\epsilon_{ir} = \epsilon_r(n_{re}/n)^{\gamma(\epsilon)}$, где γ и $\gamma(\epsilon)$ равны 0,282 для КПС из порошка с частицами округлой формы и соответственно 0,15 и 0,11 – для дендритной формы частиц; $n_{re} = 6$; $n_r = 24$, за исключением среднего размера пор для КПС из порошка с частицами округлой формы, который описывается коэффициентом $n_r = 18$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шекриладзе И. Г., Русишвили Д. Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи в процессах испарения и конденсации на капиллярных поверхностях // ИФЖ. – 1980. – № 5. – С. 393–399.
2. Регулярность структуры пористых материалов из порошка бронзы / Р. П. Тодоров, В. П. Георгиев, П. А. Витязь и др. // Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 31–33.