

УДК 536.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРООТВОДЯЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Л. Л. Васильев, Н. В. Павлюкевич, А. С. Журавлёв, О. С. Филатова,
А. В. Шаповалов**

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
E-mail: leonard_vasiliev@rambler.ru*

Разработана методика расчета массопереноса при парообразовании в пористом покрытии испарительного теплообменного элемента. Предполагается, что жидкость подводится по порам меньшего размера к крупным порам, в которых происходит испарение и вынос пара к поверхности структуры. Потоки пара из пароотводных каналов определяются на основании формул, полученных из решения соответствующих кинетических задач массопереноса в капиллярах при различных числах Кнудсена.

Условные обозначения

D – диаметр, мм; h – глубина погружения образца, мм; j – массовый расход пара, $г/(с \cdot м^2)$; T – температура, К, °С; ΔT – разность температур, К, °С; δ – толщина, мм

Введение

Явление фазовых переходов широко используется в теплообменной аппаратуре различного назначения. Теплообмен при испарении и кипении реализуется в энергетических установках, холодильной технике, химическом оборудовании, объектах электроники. Одним из наиболее эффективных способов повышения интенсивности теплообмена при фазовых переходах является нанесение на поверхность нагрева капиллярно-пористого покрытия. Эксперименты показывают, что при парообразовании на поверхности с напыленным металлическим покрытием коэффициенты теплоотдачи в 3–5 раз, а в спеченном из медного порошка пористом слое – на порядок выше, чем на поверхности без покрытия [1, 2]. Если процесс происходит на горизонтальной цилиндрической поверхности, интенсивность теплообмена в определенном диапазоне тепловых нагрузок может быть увеличена организацией комбинированного способа подвода жидкой фазы к местам образования пара – сочетанием условий большого объема и капиллярной подпитки – путем изменением высоты уровня жидкости по отношению к поверхности теплообмена [3].

При разработке испарительных теплообменников необходимо не только выполнить оценку теплообменных характеристик пористых поверхностей нагрева, но и определить предельные тепловые нагрузки, при которых происходит осушение пор. К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных по теплообмену при парообразовании в пористых телах. На основе этого материала разрабатывается методика вычисления массопереноса в пористой матрице, выполнены расчеты расходов пара для горизонтальных цилиндрических образцов с покрытием из медного порошка при разных величинах плотности теплового потока. Пористое тело рассматривается как система тонких капилляров и каналов относительно большого сечения. По первым жидкость подводится к местам парообразования, по каналам большего диаметра отводится образующийся пар. С помощью зависимостей, полученных из решения кинетических задач массопереноса в капиллярах, определяется количество макропор, функционирующих в качестве пароотводных каналов.

1. Исходная информация

В пористой матрице полости между контактными площадками спеченных частиц металлического порошка образуют систему тупиковых пор и сообщающихся между собой каналов разного проходного сечения. По каналам с малым поперечным размером жидкость с помощью капиллярных сил подводится к каналам большего диаметра (макроканалам), с поверхности криволинейных менисков в устьях микрокапилляров происходит испарение жидкости, образующийся пар отводится по макроканалам (рис. 1). Следует отметить, что в работе [4] листья растений рассматриваются как поликапиллярные тела, имеющие макро- и микропоры, где макропоры – это каналы, через которые осуществляется аэрация клеток, а микропоры – каналы, по которым движется жидкость под действием капиллярного и осмотического потенциалов. При этом число устьиц на 1 см^2 нижней части листа доходит до нескольких тысяч.

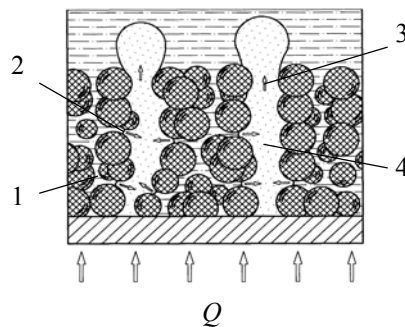


Рис. 1. Элемент поверхности со спеченным порошковым покрытием: 1 – микроканал, 2 – мениск, 3 – макроканал, 4 – паровой пузырек, 5 – зона испарения, Q – тепловой поток

Для определения пароотводящих характеристик капиллярно-пористой теплообменной поверхности разработана расчетная методика, при ее создании использованы результаты экспериментов по теплообмену при парообразовании в пористых покрытиях поверхности теплообмена, полученные в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Условия экспериментов описаны в [3]. Проанализированы данные, полученные при испарении пропана в пористом покрытии расположенных горизонтально медных цилиндрических образцов диаметром 20 мм и длиной 100 мм при полном и частичном погружении цилиндра в жидкость на глубину h , равную половине, трем четвертям диаметра и полному диаметру цилиндра (рис. 2). Покрытие изготавливалось из порошка меди, пористость составляла 50–55 %.

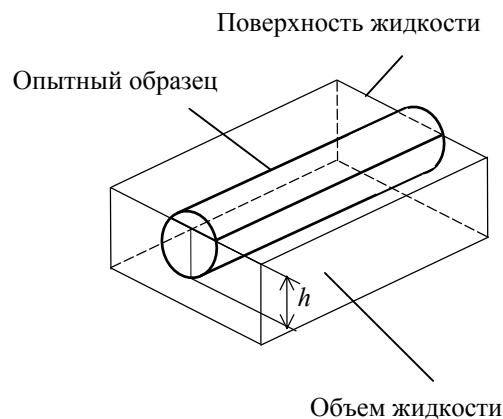


Рис. 2. Погружение опытного образца в объем жидкости на глубину h

2. Определение пароотводящих характеристик пористого покрытия

Количества каналов, через которые из пористого покрытия отводится образующийся пар, определяется по следующей схеме. По формулам, полученным из решения соответствующих кинетических задач массопереноса в капиллярах при различных числах Кнудсена [5], вычисляется массовый расход пара j через макропоры, который зависит от параметров пористого слоя и плотности теплового потока. Температурный перепад между поверхностью теплообмена и жидкостью $\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{ж}}$ при различных плотностях теплового потока определяется экспериментально. Далее с помощью полученных зависимостей находится число пароотводящих каналов на единицу теплообменной поверхности, затем может быть определено общее количество макропор на теплообменной поверхности, функционирующих в качестве пароотводных каналов. Вычисления проводятся для испарительного теплообмена, переход от конвективного режима к началу парообразования определяется по характерному излому кривых на графиках теплообмена, соответствующему временному прекращению роста или уменьшению перегревов теплоотдающей поверхности.

Участок 1 на рис. 3 соответствует свободной конвекции, когда тепло передается за счет перемещения слоев жидкости. В этом режиме парообразование отсутствует. Изломы кривых на участке 2 соответствуют началу парообразования. Образуются пузырьки пара, которые перемещаются к внешней границе пористого покрытия. Развитое кипение наблюдается на участке 3. Пар выходит по каналам, образованным макропорами (рис. 1).

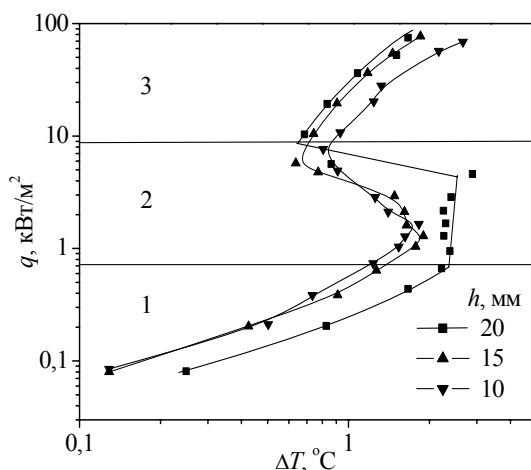


Рис. 3. Экспериментальные данные по перегревам теплообменной поверхности для образца с толщиной пористого покрытия 0,3 мм

При решении задачи приняты следующие допущения:

1. Весь тепловой поток, подводимый к основанию капиллярно-пористой структуры, расходуется на испарение жидкости (отсутствие тепловых потерь).

2. Пароотводящие каналы представляют собой цилиндрические капилляры, имеющие выход на поверхность.

3. Температура пара в капилляре считается постоянной и равной усредненной температуре $T_0 = (T_{\text{п}} + T_{\text{н}})/2$, где $T_{\text{с}}$ – температура на поверхности стенки, $T_{\text{н}}$ – температура насыщения).

4. При высоких тепловых нагрузках считается, что капилляры в непогруженной части структуры осушаются и не участвуют в выносе пара.

Оценка массового расхода пара через макроканалы с единицы поверхности теплообмена может быть выполнена с помощью формулы [5, 6]

$$j = \frac{q}{r^*} = \varepsilon_\tau \frac{p(T_0) - p(T_n)}{\sqrt{2\pi \frac{k}{m} T}} \sqrt{\beta} \pi^{1/4} = \varepsilon \Pi, \quad (1)$$

где q – тепловой поток, r^* – скрытая теплота парообразования, ε_τ – отношение суммарной площади сечения пароотводящих каналов к поверхности цилиндра («транспортная» пористость), $p(T)$ – давление насыщенных паров при температуре T , $\beta = 1/\text{Kn} = a/\Lambda$, a – характерный размер (средний гидравлический радиус канала), Λ – средняя длина свободного пробега молекул, Kn – число Кнудсена, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, m – масса молекулы жидкости.

Плотность распределения крупных пор по теплообменной поверхности определяется величиной ε :

$$\varepsilon_\tau = \frac{S_{\text{кп}}}{S_\tau} = \frac{sN}{S_\tau}, \quad (2)$$

где $S_{\text{кп}}$ – суммарная площадь сечения пароотводящих каналов (крупных пор), S_τ – площадь поверхности теплообмена (площадь поверхности цилиндра), s – площадь сечения отдельного пароотводящего канала, N – количество пароотводящих каналов.

Подставляя в соотношение (2) величину $\varepsilon = j/\Pi$, находим количество пор, по которым отводится генерирующийся в капиллярном покрытии пар:

$$N = \frac{j}{\Pi} \cdot \frac{S_{\text{кп}}}{s} = \frac{q}{r^*} \cdot \frac{\sqrt{2\pi^{1/2} \frac{k}{m} T}}{(p(T_0) - p(T_n))\sqrt{\beta}} \cdot \frac{S_{\text{кп}}}{s}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлены результаты вычислений для образцов с толщиной покрытия $\delta = 0,3$ и $0,6$ мм, диаметр частиц порошка – $63\text{--}100$ мкм при температуре насыщения в эксперименте $T_n = 20^\circ\text{C}$ (давление насыщения $p_n = 8,4$ бар = $8,4 \cdot 10^5$ Па ($p^* = p_n/p_{\text{кр}} 0,197$)).

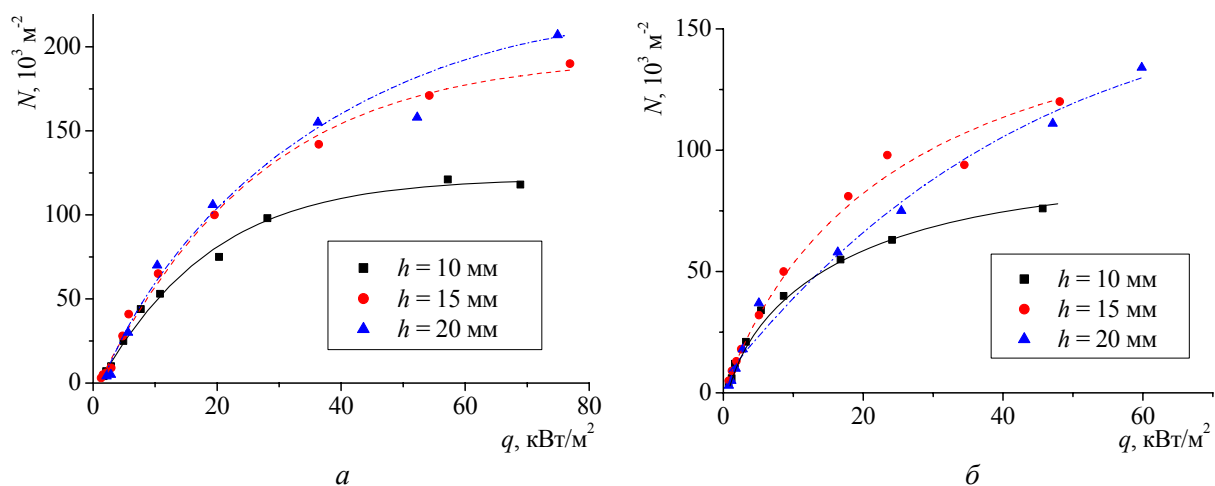


Рис. 4. Число пароотводящих каналов на единицу теплообменной поверхности образцов с толщиной покрытия $0,3$ мм (а) и $0,6$ мм (б)

Число пароотводящих каналов в рассмотренном диапазоне тепловых нагрузок растет с увеличением плотности теплового потока, однако угол наклона кривых при этом уменьшается. Количество макропор, по которым отводится образующаяся в покрытии паровая фаза, приближается к максимальному.

Рассмотренная методика позволяет получать важную информацию о теплообменных свойствах пористой поверхности, однако нуждается в проверке экспериментами на образцах с различными параметрами пористого покрытия при использовании ряда рабочих жидкостей. В дальнейшем ее развитие даст возможность расчетным путем определять теплообменные характеристики пористых поверхностей нагрева из спеченного металлического порошка при парообразовании, в том числе прогнозировать пересыхание структуры, то есть опасные режимы работы испарительных теплообменников.

Литература

1. Vasiliev L. L., Khrolenok V. V., Zhuravlyov A. S. Intensification of heat transfer at propane pool boiling on single horizontal tubes. *Revue Générale de Thermique*. 1998. Vol. 37, No. 11. P. 962–967.

2. Васильев Л. Л., Журавлёв А. С., Овсянник А. В. и др. Теплообмен при кипении пропана на поверхностях с капиллярно-пористой структурой. *Тепломассообмен – ММФ-2000*. Тр. 4-го Минского межд. форума по тепломассообмену, Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2000. Т. 5. С. 161–175.

3. Васильев Л. Л., Журавлёв А. С., Шаповалов А. В. Теплообмен при фазовых переходах жидкости в мини-каналах с пористым покрытием теплонагруженной стенки. Тр. Четвертой рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд. дом МЭИ. 2006. Т. 1. С. 160–163.

4. Реуцкий В. Г., Васильев Л. Л. О механизме регуляции температуры растительной ткани при отсутствии транспирации // *Доклады АН БССР*. 1980. Т. 24, № 11. С. 1033–1036.

5. Павлюкевич Н. В., Горелик Г. Е., Левданский В. В., Лейцина В. Г., Рудин Г. И. *Физическая кинетика и процессы переноса при фазовых превращениях*. Мн.: Наука и техника, 1980. 208 с.

6. Павлюкевич Н. В. О кинетической теории процессов переноса в пористых средах. *Инженерно-физический журнал*. 1993. Т. 64, № 6. С. 763–766.