

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;  $\Delta T$  – разность температур, К, °С;  $\delta$  – 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  $1 \text{ см}^2$  нижней части листа доходит до нескольких тысяч.

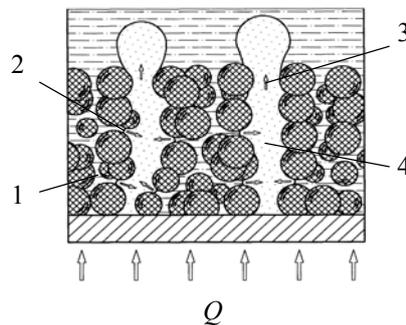


Рис. 1. Элемент поверхности со спеченным порошковым покрытием: 1 – микроканал, 2 – мениск, 3 – макроканал, 4 – паровой пузырек, 5 – зона испарения,  $Q$  – тепловой поток

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 %.

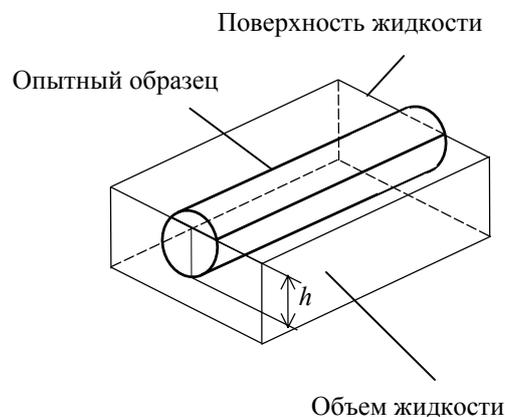


Рис. 2. Погружение опытного образца в объем жидкости на глубину  $h$

## 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).

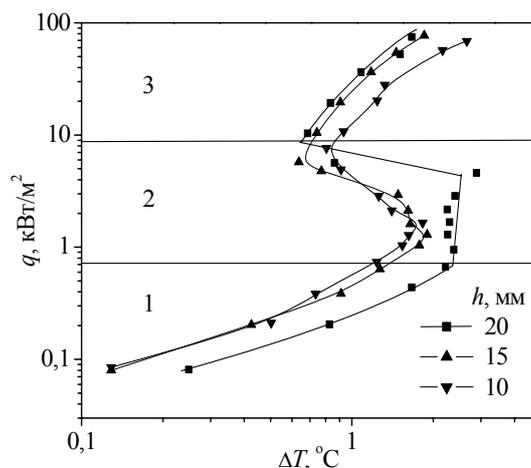


Рис. 3. Экспериментальные данные по перегревам теплообменной поверхности для образца с толщиной пористого покрытия 0,3 мм

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,  $\varepsilon_\tau$  – 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),  $\Lambda$  – средняя длина свободного пробега молекул,  $\text{Kn}$  – число Кнудсена,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана,  $m$  – масса молекулы жидкости.

Плотность распределения крупных пор по теплообменной поверхности определяется величиной  $\varepsilon$ :

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

где  $S_{\text{кп}}$  – суммарная площадь сечения пароотводящих каналов (крупных пор),  $S_\tau$  – 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 ( $p^* = p_n/p_{\text{кр}} 0,197$ )).

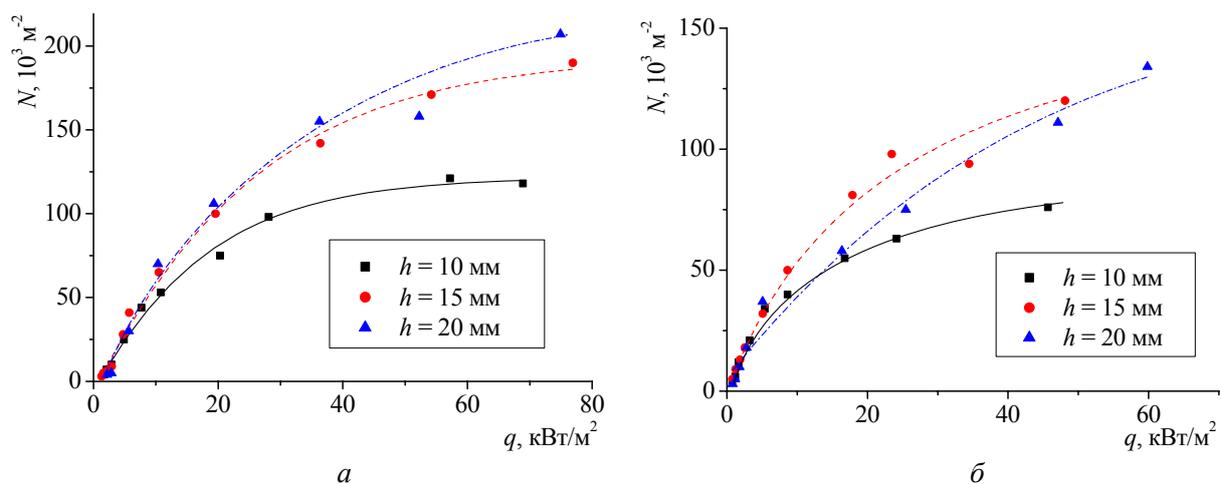


Рис. 4. Число пароотводящих каналов на единицу теплообменной поверхности образцов с толщиной покрытия  $0,3$  мм (а) и  $0,6$  мм (б)

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.