

материалов. На основании экспериментальных данных, полученных авторами, и данных из литературы предложено линейное уравнение для оценки сорбционной емкости материалов по метану в зависимости от площади удельной поверхности образцов. Улучшение объемной плотности хранения метана связано прежде всего с увеличением насыпной плотности сорбентов. Так, если повысить плотность материалов до 1,1 кг/л и при этом сохранить их сорбционные свойства, то можно достичь значений плотности хранения порядка 180 л/л, что соответствует системам хранения и транспортировки природного газа в сжатом виде при давлении 20 - 25 МПа.

УДК 536.24

### ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ ПРОПАНА В ПОРИСТОМ ПОКРЫТИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

Л.Л. Васильев<sup>1</sup>, А.С. Журавлёв<sup>1</sup>, А.В. Овсянник<sup>2</sup>,  
А.В. Шаповалов<sup>1</sup>, В.В. Литвиненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси  
zhuravl@hmti.ac.by; LVASIL@hmti.ac.by

<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

В лаборатории пористых сред Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси на протяжении многих лет изучаются теплообменные процессы при парообразовании. Выполнена серия экспериментов по исследованию теплообмена в условиях испарения пропана в капиллярно-пористом покрытии горизонтальной трубы, спеченном из медного порошка, рассматривалось влияние внешних факторов на процесс [1,2]. Исследования проводились в большом объеме и на частично затопленном образце, высота уровня жидкости  $h$  относительно нижней образующей трубы менялась от 70 до 0 мм (конструкция стенда описана в [2]). Проведены также эксперименты, в которых образец помещался между двумя вертикальными пластинами из органического стекла толщиной 5 мм (рис. 1), зазор между пластиной и пористым покрытием составлял 1.5-2 мм. Прозрачный материал пластин позволял производить визуальные наблюдения процесса.

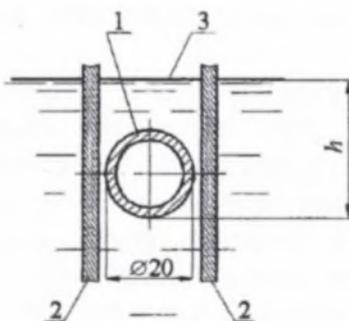


Рис. 1. Поперечное сечение рабочего участка:  
1 – экспериментальный образец, 2 – вертикальные прозрачные пластины, 3 – поверхность жидкости

На рис.2 представлены данные, полученные при температуре насыщения  $T_n = 293$  К на затопленном ( $h = 70; 20$  мм) и частично затопленном ( $h = 15; 10; 5; 0$  мм) образце с толщиной покрытия  $0.3$  мм из частиц диаметром  $0.063-0.1$  мм, пористость слоя составляла  $50-55\%$ . Как видно, в области невысоких плотностей теплового потока понижение уровня жидкости на четверть диаметра ниже верхней образующей трубы способствовало увеличению среднего коэффициента теплообмена по всей теплоотдающей поверхности. Измерения температурных напоров показали, что это происходит за счет уменьшения перегрева стенки на незатопленной части образца.

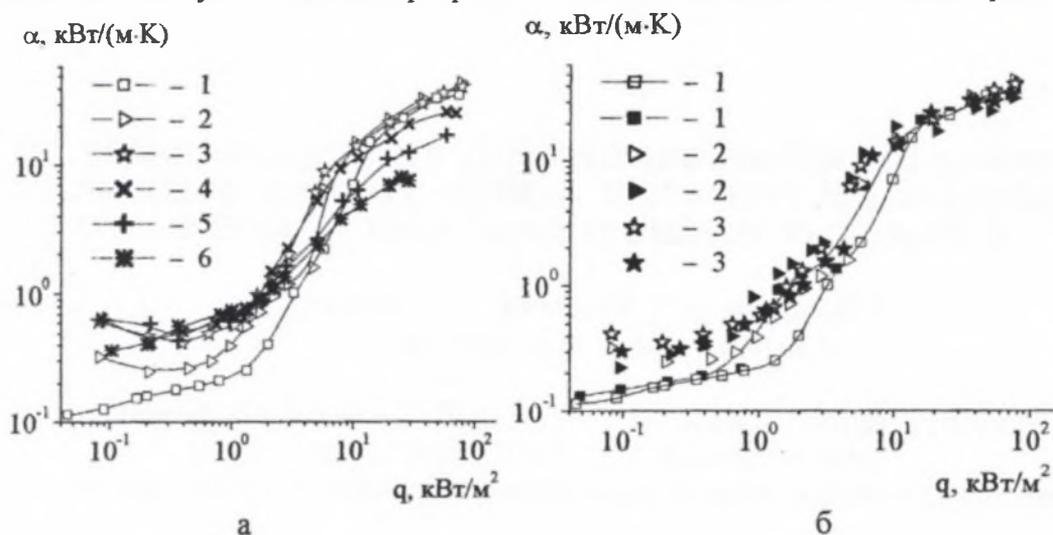


Рис. 2. Коэффициенты теплообмена при разных уровнях жидкости: 1 –  $h = 70$  мм; 2 –  $20$ ; 3 –  $15$ ; 4 –  $10$ ; 5 –  $5$ ; 6 –  $0$ . а) эксперименты без вертикальных пластин; б) сопоставление данных, полученных при отсутствии (светлые символы) и наличии (темные символы) вертикальных пластин

Можно предположить, что интенсификация теплообмена на этой части поверхности связана с отсутствием пленки жидкости в макропорах незатопленного участка. Жидкость к местам фазового перехода подводится с помощью капиллярных сил, парообразование происходит в устьях микропор на выходе в пароводящие каналы, термическое и гидродинамическое сопротивления слоя жидкости над пористой поверхностью отсутствуют.

В диапазоне тепловых нагрузок  $q = 0.1-1.5$  кВт/м<sup>2</sup> наблюдалось увеличение коэффициентов теплоотдачи в  $1.5$  раза при уровне жидкости на высоте верхней образующей трубы  $h = 20$  мм и в  $2.5-3$  раза для  $h = 15-0$  мм. При величинах  $q$  от  $10$  до  $20$  кВт/м<sup>2</sup> в случаях  $h = 20$  и  $15$  мм коэффициенты  $\alpha$  имели близкие значения и оставались более высокими, чем в большом объеме. Снижение уровня до  $10$  мм отрицательно сказывается на интенсивности теплоотдачи при тепловых нагрузках, превышающих  $1.5-2$  кВт/м<sup>2</sup>. Это связано с ростом среднего перегрева теплоотдающей поверхности вследствие ухудшения условий подвода жидкости к местам парообразования и осушения капилляров.

Наличие вертикальных пластин, ограничивающих пространство у боковых образующих, влияло на характеристики теплообмена в большом объеме до тепловых нагрузок  $\sim 20$  кВт/м<sup>2</sup>, более раннее появление первых паровых пузырей и некоторое

увеличение коэффициентов теплоотдачи наблюдались при снижении высоты слоя жидкости вплоть до уровня верхней образующей трубы ( $h=20$  мм), дальнейшее понижение уровня жидкости не влияло на интенсивность теплообмена.

Учет полученных данных при разработке теплообменной аппаратуры испарительного типа, эксплуатирующейся в условиях невысоких тепловых нагрузок и при небольших перегревах теплоотдающей поверхности, позволяет повысить ее эффективность.

## Л и т е р а т у р а

1. Васильев Л.Л., Хроленок В.В., Журавлёв А.С. Теплообмен при кипении пропана в большом объеме на поверхности трубы // Труды Второй Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 1998. Т. 4. С. 53-56.
2. Васильев Л.Л., Журавлёв А.С., Овсянник А.В., Новиков М.Н., Васильев Л.Л. мл. Теплообмен при кипении пропана на поверхностях с капиллярно-пористой структурой // Тепломассообмен ММФ-2000. Минск: АНК ИТМО НАНБ, 2000. Т. 5. С. 161-167.

УДК 536.24.8

## ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

С.В. Вершинин, Ю.Ф. Майданик

Институт теплофизики УрО РАН  
maidanik@etel.ru

Температура пара в паропроводе  $T_n$ , температура компенсационной полости (КП)  $T_{кп}$ , а также температура стенки в зоне испарения  $T_{ст}$  относятся к параметрам, отражающим температурное состояние контурной тепловой трубы (КТТ). Каждый из них определенным образом зависит от тепловой нагрузки. Замечено, что в тех случаях, когда КТТ работает в достаточно широком диапазоне тепловых мощностей, при одинаковых по величине тепловых нагрузках может наблюдаться неоднозначность ее рабочих параметров. Условия охлаждения конденсатора при этом остаются неизменными.

Целью данной работы является выяснение причин различия температурных состояний КТТ при возврате к прежней величине тепловой нагрузки. Как показал анализ результатов испытаний ряда КТТ, проведенных при последовательном росте тепловой нагрузки и затем ее снижении, на циклограммах для  $T_n(Q)$ ,  $T_{кп}(Q)$  и  $T_{ст}(Q)$  есть участки, вид которых свидетельствует о наличии явления гистерезиса при работе контурных тепловых труб. Сопоставление циклограмм для температур с циклограммой для коэффициента теплообмена при испарении в фитиле  $\alpha_n(Q)$  и данными о перемещении теплоносителя между КП и конденсатором позволило сделать вывод о причине возникновения гистерезиса рабочих параметров КТТ и о факторах, которые этому способствуют.

Основной причиной неоднозначного поведения КТТ является изменение термодинамического состояния паровой фазы в КП. Она занимает часть полости и находится в динамическом равновесии с жидкой фазой теплоносителя. Температура,