

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ ПОКРЫТИИ ЧАСТИЧНО ЗАТОПЛЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

А. В. Дегтяренко

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель А. В. Шаповалов

Организация процессов теплообмена при испарении и кипении хладагентов на развитых поверхностях и покрытиях приобретает целесообразность в аппаратах испарительного типа холодильной техники и химической промышленности. Для разработки энергетических машин и другой аппаратуры, отвечающей современным требованиям, необходимо исследование закономерностей теплообмена при парообразовании на поверхностях с пористым покрытием в различных условиях. Определяющее значение имеет выбор теплоносителей либо хладагентов. Теплофизические характеристики и химические свойства позволяют рассматривать углеводороды как перспективные рабочие жидкости.

Обычно работа капиллярно-пористых поверхностей проходит в условиях, отличных от большого объема, когда вокруг поверхности есть свободный объем жидкости. Работа таких покрытий изучена многими авторами именно в условиях большого объема. По условиям стеснения экспериментальных данных нет, аналитических тоже. Поэтому целью этой работы является изучение теплообмена наиболее перспективных покрытий в условиях, отличных от большого объема.

Была проведена серия экспериментов, с частично затопленной капиллярно-пористой структурой. Процесс кипения рабочей жидкости на экспериментальном образце осуществляется в кипятильной камере из нержавеющей стали, в объем которой вмонтирован конденсатор для поддержания постоянных параметров насыщения. Тепловой поток к образцу подводится от электрического нагревателя. Для замены рабочей жидкости, монтажа и заполнения кипятильной камеры предусмотрена вспомогательная камера со встроенной системой охлаждения. Для поддержания адиабатных условий при проведении экспериментов кипятильная и вспомогательная камеры помещены в климатический бокс, температура в котором поддерживается равной температуре насыщения рабочей жидкости в кипятильной камере при помощи контуров нагрева и охлаждения. Контур охлаждения и нагрева снабжены погружным жидкостным насосом и ротаметром. Кипятильная камера подключается к системе вакуумирования, состоящей из вакуумметра и вакуумного насоса.

Опытными образцами служили горизонтальные медные трубы длиной 100 мм с внешним диаметром 20 мм и толщиной стенок 2 мм. На поверхность теплообмена напекалось пористое покрытие из порошка меди ПМС-Н.

На рис. 1 представлены данные, полученные для частично затопленной структуры ($h = 15; 10; 5$ мм), толщиной $\delta = 0,3$ мм в свободном объеме. Схожие закономерности между изменениями коэффициента теплоотдачи и плотностью теплового потока фиксировались и для структур толщиной $\delta = 0,6$ и $0,8$ мм. При значении $h = 20$ мм жидкость полностью покрывала структуру, уровень жидкости устанавливался по верхней образующей трубы. Для сопоставления данных на графике показана характеристика теплоотдачи полностью затопленной структуры ($h = 80$ мм) при наличии слоя жидкости $h' = 60$ мм над верхней образующей образца.

В области невысоких тепловых нагрузок ($q < 5 \text{ кВт/м}^2$) понижение уровня жидкости относительно верхней образующей трубы на четверть и половину диаметра ($h = 15 \text{ мм}$) способствовало увеличению среднего по теплоотдающей поверхности коэффициента теплоотдачи. Повышение интенсивности теплообмена наблюдалось для трех структур разной толщины. Измерения температурных напоров показали, что это происходило за счет уменьшения перегрева стенки на незатопленной части образца, куда жидкость поступала за счет действия капиллярных сил. При величинах $q = 0,1\text{--}5 \text{ кВт/м}^2$ наблюдалось повышение коэффициентов теплоотдачи в 1,5 раза при высоте слоя жидкости на уровне верхней образующей образца ($h = 20 \text{ мм}$), в 2,5–3 раза при уровнях жидкости ниже верхней образующей на четверть и половину диаметра трубы ($h = 15; 10 \text{ мм}$). Для частично затопленных капиллярно-пористых структур разной толщины первые паровые пузыри очень маленького диаметра $d \sim 0,1 \text{ мм}$ генерировались с высокой частотой по линии касания жидкости пористого тела, фиксировались при более низких значениях осредненного перегрева стенки ΔT , по сравнению с процессом теплообмена для структур в объеме жидкости.

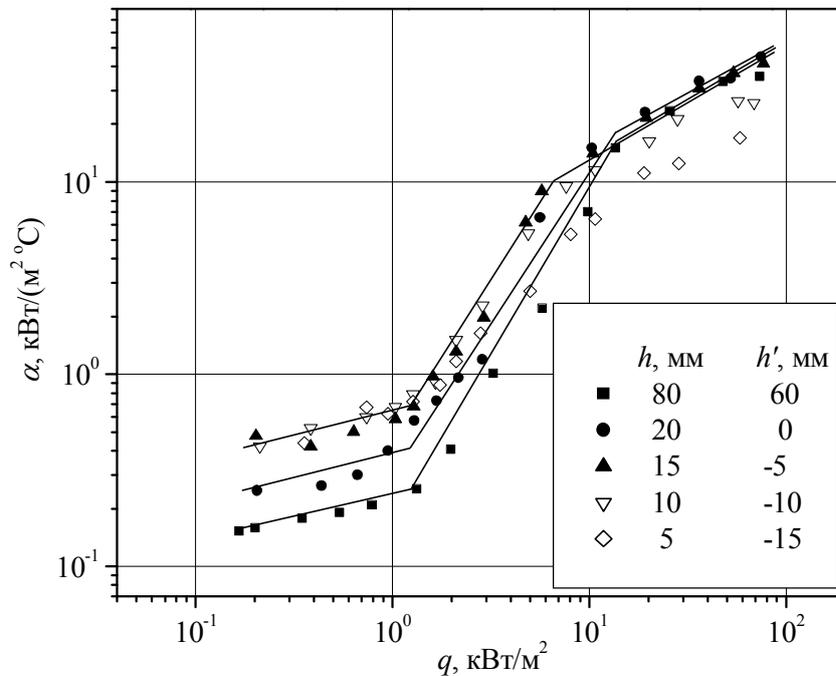


Рис. 1. Характеристики процесса парообразования для частично затопленной капиллярно-пористой структуры при толщине пористого покрытия $\delta = 0,3 \text{ мм}$

Для тепловых нагрузок ($q > 10 \text{ кВт/м}^2$) коэффициенты теплоотдачи были сравнимы с α полностью залитых структур только при уровнях жидкости $h = 20; 15 \text{ мм}$. Снижение уровня до половины диаметра трубы и ниже ($h = 10; 5 \text{ мм}$) отрицательно сказывалось на интенсивности теплоотдачи при тепловых нагрузках выше 10 кВт/м^2 . Это связано с ростом перегрева незатопленной поверхности вследствие осушения капилляров, подводящих жидкость к местам парообразования. По медленному росту температуры верхней образующей стенки в условиях стационарного режима фиксировалось наступление капиллярного кризиса теплоотдачи. При достижении $\Delta T = 10 \text{ °С}$ эксперимент прекращался с целью предупреждения замыкания на обмотке нагревате-

ля. На незатопленной поверхности структур в отдельных местах наблюдались скопления паровых пузырей в виде пятен пены, которые мгновенно испарялись.

Экспериментальные данные показывают, что в исследуемом интервале изменения плотности теплового потока для покрытий разной толщины существует оптимальная степень погружения структур, при которой уровень жидкости ниже верхней образующей трубы на четверть диаметра ($h = 15$ мм). При таком значении h фиксировалась высокая интенсивность теплообмена для низких тепловых нагрузок, в области высоких плотностей теплового потока коэффициенты теплоотдачи были сравнимы с α затопленных структур. В области низких тепловых нагрузок (до значения $q \sim 7$ кВт/м²) более высокие коэффициенты теплоотдачи получены для структуры толщиной $\delta = 0,8$ мм, осредненный перегрев стенки в этом случае слабо зависит от подводимого теплового потока. Для высоких значений q интенсивность теплообмена в такой структуре резко снижается. При $q = 60$ кВт/м² отношение $\alpha_{0,3}/\alpha_{0,8} \sim 1,8-2$. Покрытия толщиной $\delta = 0,6$ мм и $0,8$ мм имеют более развитую систему капилляров, подводящих жидкость, большее число локальных центров испарения по внутреннему объему структуры. Заполнение паром внутренних полостей «толстых» структур на высоких тепловых нагрузках ведет к снижению эквивалентной теплопроводности покрытия, росту перегрева стенки и понижению коэффициентов теплоотдачи.

В соответствии с моделями кипения на пористых покрытиях поверхности паровых каналов постоянно смочены пленкой жидкости, ухудшающей условия для выхода пара. Возможно предположить, что пленка жидкости в макропорах будет отсутствовать. Во время подвода тепла часть тепловой нагрузки идет на организацию парообразования внутри пористого слоя, часть передается жидкости, омывающей затопленную поверхность покрытия, через смоченный скелет структуры. В объеме пористого слоя нагрев поступающей в капилляры жидкости происходит в условиях весьма высокой интенсивности теплообмена. При малых диаметрах капилляров движение жидкости в них всегда ламинарное. В условиях развитой поверхности покрытия только за счет подогрева жидкости от стенки отводятся большие тепловые потоки. При отсутствии пленки жидкости в макропорах незатопленного участка определяющим процессом теплообмена в этой части структуры будет процесс испарения в объеме открытых пор. Основным стоком тепла в этом случае являются поверхности менисков, образованных в местах примыкания жидкостных капилляров к открытым порам. Совместное существование процессов испарения и нагрева жидкости в капиллярах приводит к существенной интенсификации теплоотдачи при низких плотностях подводимого теплового потока.

При испарении в капиллярно-пористом покрытии частично затопленной горизонтальной цилиндрической поверхности в условиях малых тепловых нагрузок коэффициенты теплоотдачи могут быть в 2–3 раза выше, чем при парообразовании в большом объеме.

Учет полученных данных может быть полезен при проектировании теплообменного оборудования испарительного типа.