

## ОПЫТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОМЕЩЕННОГО В ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ МИНИКАНАЛ

А. С. Сысоев

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

Основной проблемой, определяющей развитие энергетической отрасли в Беларуси, является проблема неэкономичного производства и использования энергии. Решение данного вопроса возможно за счет создания высокоэффективных теплотехнических агрегатов, применения оправданных инновационных способов передачи и трансформации энергии, наиболее полного использования вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии, обеспечения необходимого температурного уровня работы оборудования, снижение необратимых потерь теплоты. Одним из способов сокращения потерь от внешней необратимости тепловых процессов в теплообменных аппаратах является снижение температурных напоров между средами. Однако низкие температурные напоры приводят к уменьшению передаваемого теплового потока, увеличению весовых параметров и габаритных размеров оборудования.

Найти решение проблемы возможно путем изменения поверхностных условий теплообмена – развития теплоотдающей поверхности ребрением или нанесением различного рода покрытий, что наиболее оправдано в испарительных теплообменных аппаратах при использовании фазового перехода теплоносителя для обеспечения интенсивной теплопередачи. Наиболее эффективными в области низких температурных напоров являются медные капиллярно-пористые покрытия. Например, замена ребренных труб на трубы с медным металлизационным покрытием в кожухотрубных испарителях холодильных машин позволяет уменьшить в 1,5–2 раза габаритные размеры аппаратов, массу кожуха и крышек.

Была проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена при парообразовании пропана на трубах, покрытых медными спеченными капиллярно-пористыми структурами. Опыты проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

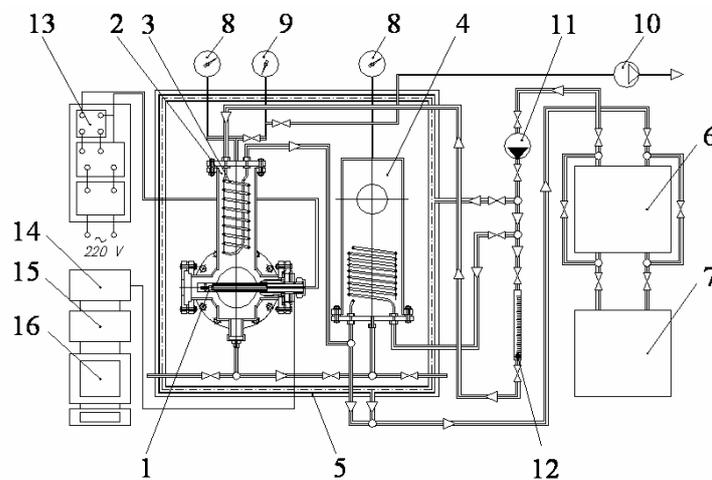


Рис. 1. Экспериментальная установка

Процесс кипения рабочей жидкости на экспериментальном образце 1 осуществляется в кипяtilьной камере 2 из нержавеющей стали, в объем которой вмонтирован конденсатор 3 для поддержания постоянных параметров насыщения. Экспериментальный образец крепится на штативе, размещенном в центральной части кипяtilьной камеры с помощью фланцевого соединения. Тепловой поток к образцу подводится от электрического нагревателя, расположенного внутри медной цилиндрической оболочки штатива. Фланец штатива снабжен сальником для вывода термодпар. Для замены рабочей жидкости, монтажа и заполнения кипяtilьной камеры предусмотрена вспомогательная камера 4 со встроенной системой охлаждения. Для поддержания адиабатных условий при проведении экспериментов кипяtilьная и вспомогательная камеры помещены в климатический бокс 5, температура в котором поддерживается равной температуре насыщения рабочей жидкости в кипяtilьной камере при помощи контуров нагрева (термостаты 6) и охлаждения (холодильные машины 7). Контуров охлаждения и нагрева снабжены погружным жидкостным насосом 11 и ротаметром 12. Кипяtilьная камера подключается к системе вакуумирования, состоящей из вакуумметра 9 и вакуумного насоса 10.

Нагреватель рабочего участка запитан от сети 220 В. Электроизмерительная система нагревателя 13 состоит из стабилизатора напряжения С-05, лабораторного автотрансформатора РНО-250, выпрямителя тока ВСА-5А, вольтамперметров М1108. Для измерения температуры используются медь-константановые термопары с толщиной проводников 0,12 мм. Сбор и обработка информации производится автоматизированным комплексом, в состав которого входит коммутатор измерительных сигналов Ф7078К 14, электронный цифровой вольтметр Щ68000 15 и ПЭВМ 16. Более подробное описание экспериментальной установки и методики проведения исследований представлено в [2]. 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. Для определения структурных свойств пористых покрытий и проницаемости в лаборатории пористых сред были проведены соответствующие эксперименты.

Эксперименты проводились при температуре насыщения  $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , давлении  $p_n = 8,4\text{ бар} = 8,4 \cdot 10^5\text{ Па}$  ( $p^* = 0,197$ ), в диапазоне тепловых нагрузок  $q = (0,03\text{--}80)\text{ кВт/м}^2$ . Высота уровня жидкости  $h$  измерялась относительно нижней образующей трубы и менялась от 0 до 80 мм.

В ряде опытов труба помещалась между двумя горизонтальными пластинами из прозрачного материала и в горизонтальный кольцевой канал из стекла таким образом, чтобы зазор между внешней границей пористой структуры и прозрачной поверхностью составлял 1,5–2 мм (рис. 2).

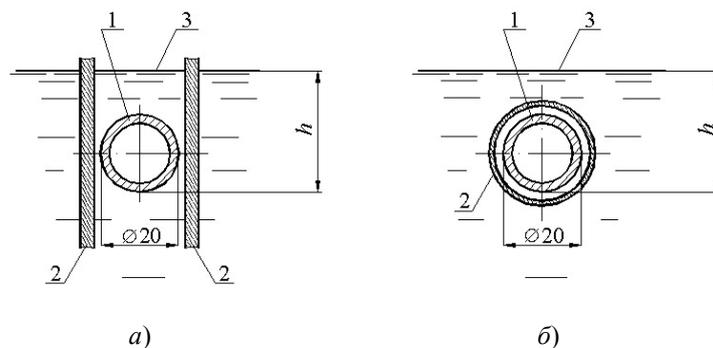


Рис. 2. Размещение трубы с пористым покрытием:  
 а – между вертикальными пластинами; б – в горизонтальном кольцевом зазоре:  
 1 – труба с пористым покрытием; 2 – прозрачная ограничивающая стенка;  
 3 – уровень жидкости относительно нижней образующей

Можно отметить, что наличие ограничивающих стенок обеспечивает повышение коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции у горизонтального нагретого цилиндра либо системы таких цилиндров. Результаты представлены на рис. 3.

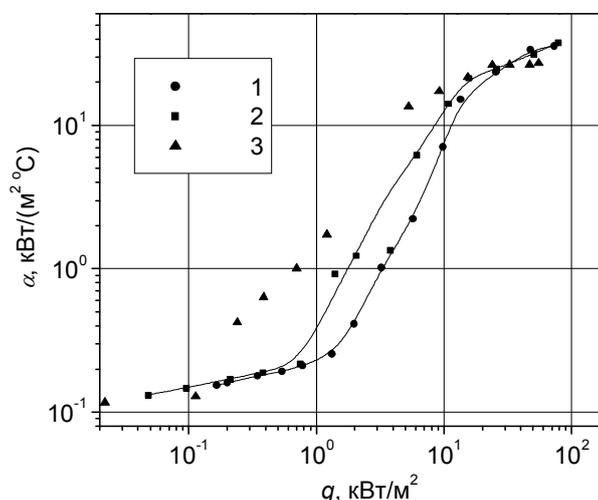


Рис. 3. Сопоставление опытных данных при организации парообразования на капиллярно-пористой структуре толщиной  $\delta = 0,3$  мм в свободном объеме (1) и в условиях вертикального прямоугольного канала (2) и горизонтального кольцевого зазора (3). Высота уровня жидкости  $h = 80$  мм

Опытные данные показывают, что наличие ограничивающего пространства у внешней поверхности пористой структуры, в большом объеме оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи до тепловых нагрузок  $\sim 20$  кВт/м<sup>2</sup>. Более раннее появление первых паровых пузырей и некоторое увеличение коэффициентов теплоотдачи наблюдалось при снижении высоты слоя жидкости до уровня верхней образующей трубы ( $h = 20$  мм). В этих условиях при наличии ограничивающих пластин температурные напоры  $\Delta T = T_{ст} - T_{ж}$ , соответствующие выходу на поверхность первых пузырей, были меньше, чем в опытах без пластин. Измерения показали, что средние перегревы снижались за счет уменьшения температуры на боковых образующих поверхности трубы в случае вертикального прямоугольного канала и понижения температуры верхней образующей – при помещении трубы в горизонтальный кольцевой канал.

Возможной причиной повышения интенсивности теплообмена могло являться перемешивание жидкости проходящими через зазор пузырями, в результате которого место перегретой жидкости у поверхности образца занимала жидкость при температуре насыщения. Исследование теплообмена при парообразовании в стесненных условиях предполагает, что скользящие вдоль теплоотдающей поверхности пузыри формируют перегретый микрослой на поверхности нагрева, который быстро испаряется, обеспечивая высокие локальные коэффициенты теплообмена. При повышении тепловой нагрузки мелкие паровые пузырьки сливались в крупные, заполняли зазор и скользили вдоль поверхности нагрева. Пузыри, образующиеся на боковых поверхностях трубы, сливались с пузырями, всплывавшими снизу, образовывали скопления, прохождение которых через узкий зазор было затруднено.

Условия ограничения пространства способствуют интенсификации теплоотдачи при парообразовании в медных спеченных капиллярно-пористых структурах вследствие изменения гидродинамики парожидкостного потока, омывающего структуру.