

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПСЕВДОКАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ
ПАРОВОЙ СМЕСИ ВОДА-ЭТАНОЛ НА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ****Чиндяков А.А., Смирнов Ю.Б.**Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

При конденсации бинарных паровых смесей неограниченно смешивающихся жидкостей с сильно различающимися коэффициентами поверхностного натяжения происходит переход от пленочного режима конденсации к псевдокапельному, который, в отличие от капельного режима, реализуется на смачиваемой поверхности теплообмена. При псевдокапельной конденсации паровых смесей на гладких трубах и пластинах были получены такие же высокие коэффициенты теплоотдачи, как при капельной конденсации [1]. Для применения этого нового способа интенсификации теплообмена на практике требуется проведение экспериментальных исследований теплообмена при псевдокапельной конденсации паровых смесей не только на гладких, но и на оребренных поверхностях теплообмена. В данной работе изложены результаты экспериментального исследования теплообмена при псевдокапельной конденсации практически неподвижной паровой смеси вода-этанол на горизонтальных оребренных трубах.

Экспериментальная установка, схема которой подробно описана в [1], позволяла в автоматизированном режиме производить сбор и обработку первичных данных, с высокой точностью управлять режимными параметрами эксперимента, а также получать зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора пар-стенка с заранее заданным шагом по температурному напору.

Коэффициент теплоотдачи α находили как отношение плотности теплового потока на стенке к температурному напору между паром и стенкой $\Delta T = T_s - T_c$. Плотность теплового потока на стенке определялась по расходу охлаждающей воды, измеряемому электромагнитным расходомером, и ее подогреву, который находили по результатам измерения среднемассовой температуры платиновыми термометрами сопротивления, установленными в потоке охлаждающей воды на входе в опытную трубку и на выходе из нее. Температура трубы измерялась заложенными в стенку термопарами, горячие спаи которых располагались под ребром, расположенным в среднем сечении участка конденсации. При вычислении ΔT использовалось среднее по периметру трубы значение температуры стенки (T_c). Температура конденсации T_s определялась по диаграмме «температура – состав» для смеси вода-этанол с учетом давления в рабочем участке, измеряемого образцовым манометром, и состава смеси, который находили при помощи призматического рефрактометра.

Для определения коэффициентов теплоотдачи наряду с описанным выше «прямым» методом в качестве дублирующего применялся также «косвенный» метод, основанный на представлении общего термического сопротивления в процессе конденсации пара в виде суммы его составляющих и не требующий измерения температуры стенки. Необходимая

для его корректного использования уточненная зависимость для расчета теплоотдачи со стороны охлаждающей воды была получена при обработке опытных данных по конденсации чистого неподвижного водяного пара на гладкой горизонтальной трубе с использованием модифицированного метода Вильсона.

Опыты проводились на трех медных трубах, на наружной поверхности которых имелись прямоугольные кольцевые ребра. Высота и толщина ребер для всех труб составляла 1,0 мм, диаметр по корням ребер 10,0 мм, а расстояние между ребрами $s=1,3, 2,0$ и $3,0$ мм. Степень развития поверхности труб за счет оребрения была равна соответственно 2,05, 1,8 и 1,6. Опыты проводились при давлениях от 0,12 до 0,15 МПа. При расчете коэффициента теплоотдачи по опытным данным тепловой поток относили к поверхности гладкой трубы с диаметром, равным диаметру оребренной трубы, измеренному по корням ребер. Предварительно на тех же трубах была проведена серия опытов по конденсации чистого водяного пара. Наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи были получены при $s=2$ мм. Результаты опытов на чистом водяном паре при всех значениях s хорошо согласуются с расчетом теплоотдачи по методике Сринивасана с сотр. [2].

Эксперименты по конденсации паровой смеси вода-этанол проводились при трех значениях массовой концентрации этанола в паре: $c_v=8,7, 12$ и $14,5\%$. Опытные данные по теплоотдаче, полученные «прямым» и «косвенным» методами, согласуются между собой в пределах 15%.

На рис.1 представлены зависимости α от ΔT (кривые конденсации), полученные с использованием «прямого» метода для каждой концентрации этанола в паровой фазе при разных расстояниях между ребрами. Кривую конденсации можно условно разделить на три участка: 1) участок с низкой теплоотдачей, обусловленной преобладанием диффузионного сопротивления в паровой фазе; 2) резкий рост теплоотдачи (переход к псевдокапельному режиму конденсации); 3) ниспадающий участок кривой конденсации (постепенный переход к пленочному режиму). При фиксированном расстоянии между ребрами увеличение c_v приводит к повышению ΔT , при котором начинается второй участок кривой конденсации.

Наибольшее значение коэффициента теплоотдачи для $c_v=8,7\%$ и $s=2$ мм (см. рис.1, б) было примерно в 4 раза выше, чем при пленочной конденсации чистого водяного пара на горизонтальной гладкой трубе, что связано не только с оребрением поверхности теплообмена, но и с интенсификацией теплообмена за счет перехода к псевдокапельному режиму конденсации. С ростом c_v максимальное значение коэффициента теплоотдачи понижается, и ему соответствуют все большие значения ΔT .

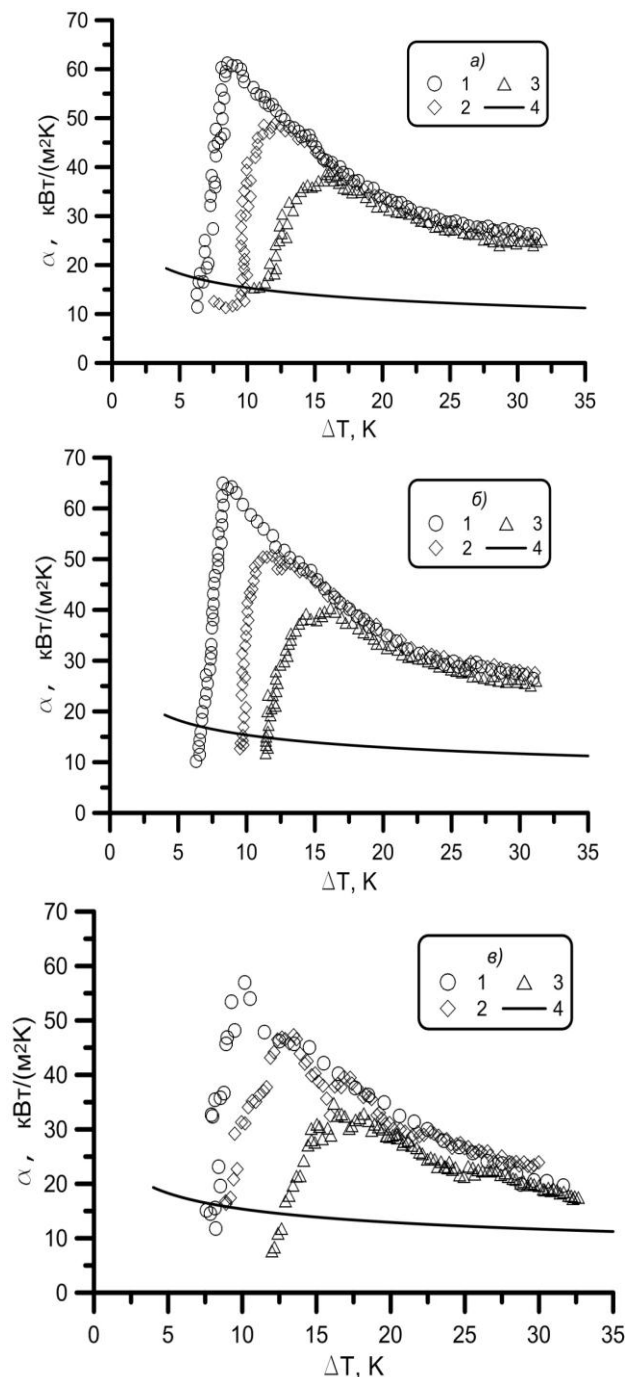


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора пар-стенки при конденсации паровой смеси вода-этанол на оребренных трубах:
 а - $s=1,3$ мм; б - $s=2,0$ мм; в - $s=3,0$ мм;
 точки: 1 - $c_v=8,7\%$; 2 - $c_v=12\%$; 3 - $c_v=14,5\%$;
 4 - кривая, рассчитанная по теории Нуссельта для конденсации на гладкой трубе при $c_v=0$

Судя по опытным данным, начало резкого роста теплоотдачи соответствует температурному напору пар-стенки, близкому к разности температур конденсации и кипения, определенной для данного значения c_v по диаграмме фазового равновесия.

На рис. 2 показаны наши опытные данные для оребренной трубы с $s=2,0$ мм, полученные при $c_v=12\%$, в сравнении с опытными данными Мурасы с сотр. [3] по псевдокапельной конденсации на горизонтальной гладкой трубе паровой смеси вода-этанол с близкой концентрацией этанола в паре ($c_v=10\%$). Видно, что максимальное значение коэффициента теплоотдачи при конденсации на оребренной трубе примерно в 2 раза выше, чем на гладкой трубе. При переходе от псевдокапельного режима конденсации к пленочному коэффициент теплоотдачи на оребренной трубе снижается с ростом температурного напора быстрее, чем на гладкой трубе. Однако даже при $\Delta T=30$ К коэффициент теплоотдачи на оребренной трубе в 1,5 раза больше, чем при псевдокапельной конденсации на гладкой трубе.

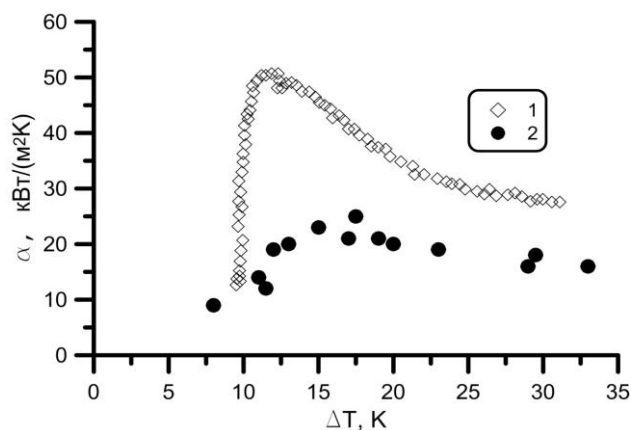


Рис. 2. Сравнение опытных данных по теплоотдаче при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на гладкой и оребренной трубах:
 1 - оребренная труба с $s=2$ мм, $c_v=12\%$;
 2 - данные Мурасы с сотр. [3] для гладкой трубы, $c_v=10\%$

Таким образом, оребрение горизонтальных труб позволяет заметно интенсифицировать теплообмен при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол.

Список литературы:

1. Чиндяков А.А., Смирнов Ю.Б. Теплообмен при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на гладких и оребренных трубах // Вестник МЭИ. 2013. №1. С. 46-54.
2. Srinivasan P., Balasubramanian P., Gaitonde U. Correlation for laminar film condensation over single horizontal integral - fin copper tubes // Proceedings of the 12th International Heat Transfer Conference. 2002. P. 196-201.
3. Murase T., Wang H.S., Rose J.W. Marangoni condensation of steam-ethanol mixtures on a horizontal tube // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. P. 3774-3779.

Работа выполнена по Программе государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (грант № НШ - 3783.2014.8).