

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ НА ОРЕБРЕННЫХ ТЕПЛОТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Е. Н. МАКЕЕВА

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Самым эффективным методом интенсификации теплообмена является создание благоприятных поверхностных условий для возникновения и роста паровых пузырей – развитие теплоотдающей поверхности: применение оребрения с определенными геометрическими параметрами, нанесение на поверхность различного рода покрытий. В связи с этим возникает необходимость в выборе способа развития теплоотдающей поверхности применительно к конкретным условиям работы теплообменного аппарата.

В холодильных и теплонасосных установках получили распространение ребристо-трубные испарители, изготавливаемые из труб, оребренных различными способами. Оребрение труб часто применяют для увеличения наружной теплопередающей поверхности.

При кипении жидкостей на ребристых поверхностях вследствие термического сопротивления теплопроводности в ребрах возникают градиенты температуры, величина которых зависит от геометрических размеров ребра, коэффициента теплопроводности материала ребра, теплофизических свойств жидкости и условий охлаждения. В результате падения температуры от основания к вершине ребра местные температурные напоры по высоте ребра могут соответствовать различным режимам кипения.

Таким образом, применение ребер при отводе теплоты кипящей на них жидкостью приводит к тому, что даже при температурах в основании, соответствующих пленочному режиму кипения, за счет передачи ребром теплоты теплопроводностью и, как следствие, падения температурного напора по высоте ребра, на поверхности ребра существует развитый пузырьковый и переходный режимы кипения. В сочетании с эффектом развития поверхности теплообмена через основание ребра могут быть переданы тепловые потоки плотностью, в несколько раз превышающие $q_{кр1}$ при умеренных температурных напорах. В связи с этим применение оребренных поверхностей для отвода тепловых потоков высокой плотности в кипящую жидкость представляет значительный интерес [1].

Целями данной работы являются:

– теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на развитых теплообменных поверхностях;

– установление обобщенных зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи и влияния на них различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в аппаратах холодильных и теплонасосных установок.

Анализ экспериментальных исследований

В настоящей работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении фреонов R407c, R404A, R410 на горизонтальных оребренных трубках. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке в условиях свободного движения рабочего тела при давлениях насыщения $p_n = 0,9-1,4$ МПа при плотностях теплового потока $q = 5-35$ кВт/м². Исследования проводились на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1 [3].

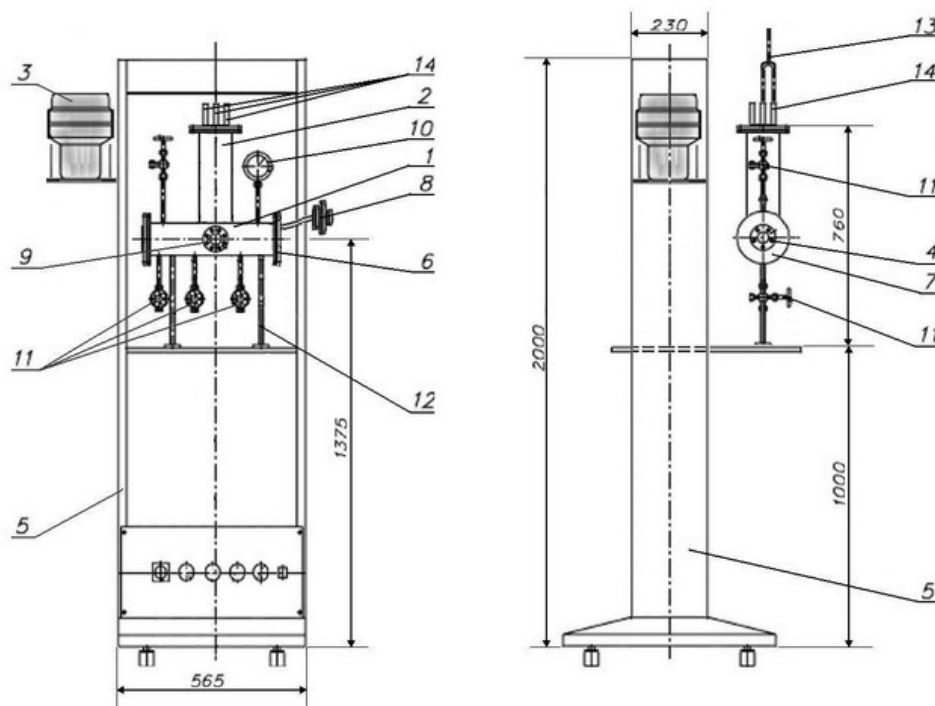


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования процессов парообразования в испарителях:

- 1 – рабочая камера; 2 – конденсатор; 3 – баллон с рабочей жидкостью;
- 4, 9 – иллюминатор; 5 – стойка; 6, 7 – фланцы; 8 – вывод термомпар; 10 – манометр;
- 11 – вентиль; 12 – опора рабочей камеры; 13, 14 – вход и выход охлаждающей жидкости

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен экспериментальный образец с оребренной поверхностью, представляющий собой горизонтальную трубку из дюралюминия, выполненную путем фрезерования и накатки.

Основные геометрические характеристики образца представлены в табл. 1, где d_o – диаметр образца по основной поверхности; D_o – наружный диаметр ребра; $d_{вн}$ – внутренний диаметр образца; φ_p – межреберный угол; δ_o – толщина ребра у его основания; δ_b – толщина у вершины ребра; L_o – длина образца; N_p – количество ребер; h_p – высота ребра; F_o – площадь образца по основной поверхности; F_n – полная наружная площадь образца.

Таблица 1

Геометрические параметры исследуемого образца

d_o , мм	D_o , мм	$d_{вн}$, мм	φ_p , град	δ_o , мм	δ_b , мм	L_o , мм	N_p , шт.	h_p , мм	F_o , м ²	F_n , м ²
25	50	16	0	4	2	320	24	12,5	0,013973	0,027161

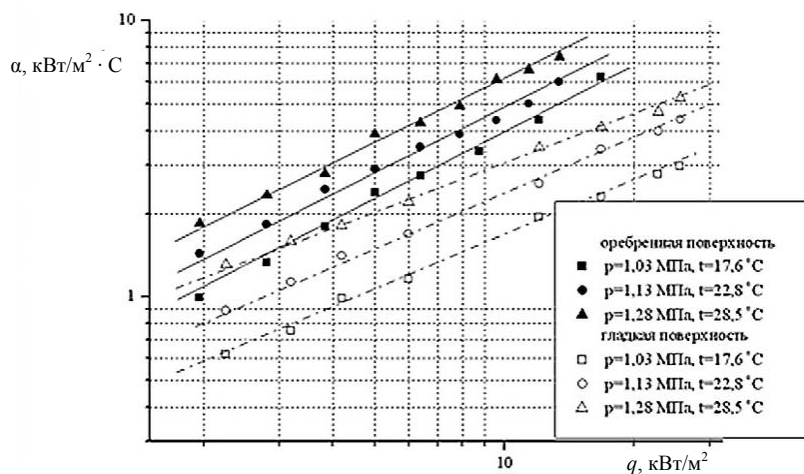


Рис. 4. Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреона R407c на оребренной и гладкой поверхностях

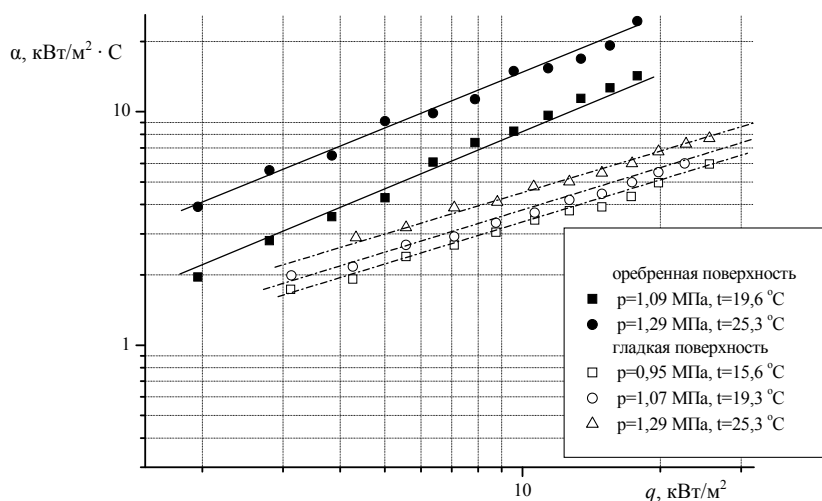


Рис. 5. Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреона R404a на оребренной и гладкой поверхностях

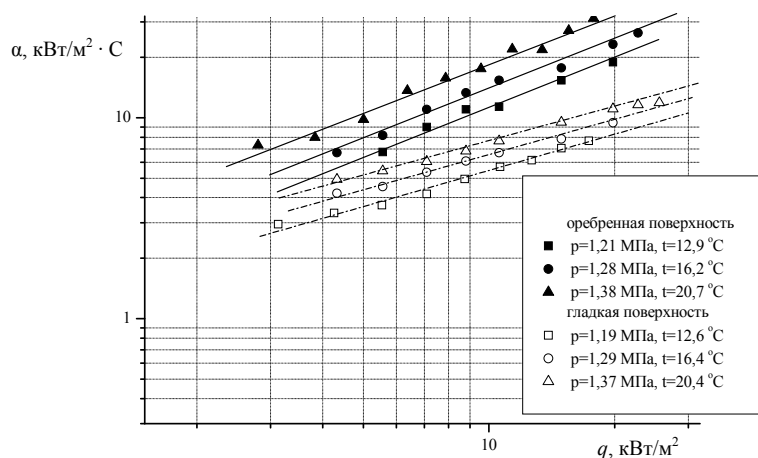


Рис. 6. Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреона R410a на оребренной и гладкой поверхностях

Как видно из рисунков, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на ребристой поверхности значительно выше, чем на гладкой, т. е. при развитом пузырьковом режиме кипения теплообмен на оребренных поверхностях в 2–4 раза интенсивнее, чем на гладкой поверхности.

Наличие оребрения приводит к интенсификации теплоотдачи в основном за счет развития поверхности теплообмена и улучшения условий зарождения и роста паровых пузырей. Величина коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкости зависит от давления, повышение которого приводит к интенсификации теплообмена, причем степень влияния давления по-разному проявляется в зависимости от вида теплоотдающей поверхности и теплофизических свойств жидкости.

Результаты экспериментов показывают, что α непрерывно возрастает с увеличением давления. С ростом давления уменьшается величина критического радиуса парового зародыша, и генерация пара начинается на ранее не активных микровпадинах наружной поверхности ребер, которые при высоких значениях плотности теплового потока благодаря высокой теплопроводности материала исследуемых образцов оказываются достаточно перегретыми. По мере уменьшения $R_{кр}$ с ростом давления количество работающих центров парообразования увеличивается, вследствие чего возрастает коэффициент теплоотдачи. Однако при достаточно больших плотностях теплового потока преобладающая часть потенциальных центров парообразования уже включена в работу по генерации паровых пузырей и дальнейшее увеличение давления не приводит к интенсификации теплообмена. Более того, постепенное изменение теплофизических свойств жидкости, связанное с ростом давления, приводит к ослаблению других благоприятных для кипения факторов, и может иметь место тенденция к снижению коэффициентов теплоотдачи [2].

Кроме того, повышение интенсивности теплообмена с увеличением давления насыщения при кипении вызывается уменьшением отрывного диаметра парового пузыря и увеличением плотности центров парообразования. Интенсивность теплоотдачи при кипении зависит также и от теплофизических свойств жидкости, которые по мере изменения давления (и температуры) насыщения существенно меняются. С увеличением коэффициента теплопроводности жидкости теплоотдача повышается, поскольку основной поток тепла от стенки воспринимается жидкой, а не паровой фазой. С увеличением вязкости теплоотдача, наоборот, уменьшается, так как уменьшается интенсивность перемешивания жидкости, обусловленная парообразованием.

Коэффициент теплоотдачи при кипении является функцией многих аргументов. Поэтому наряду с приближенными выражениями функции, имеющими достаточное физическое обоснование, возможен ряд вариантов выражения этой функции, по существу слабо отражающих физику процесса, но более или менее удовлетворительно соответствующих опытным данным для некоторых жидкостей, интервалов давлений, тепловых нагрузок и т. п. Этим объясняется наличие недостаточно обоснованных критериальных систем и формул, которые базируются на использовании аналогий, термодинамического подобия и т. п. и получены в результате формальных математических операций или путем случайного выбора критериев.

В результате обобщения полученных результатов при кипении хладагентов на оребренных трубах удалось получить общую эмпирическую зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи для хладагентов R404a, R407c и R410a с погрешностью $\pm 20\%$ [4]:

$$\alpha = 6,3 \cdot p^{0,25} \cdot q^{0,64}. \quad (1)$$

Заключение

1. Проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на оребренных поверхностях при следующих режимных параметрах: при давлениях насыщения $p_n = 0,9-1,4$ МПа, температурах насыщения $t_n = 12,9-28,5$ °С, плотностях теплового потока $q = 5-35$ кВт/м².

2. Выявлено влияние различных факторов на интенсификацию теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов.

3. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на оребренных поверхностях в диапазоне давлений насыщения в пределах 0,9–1,4 МПа в условиях большого объема. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются полученными уравнениями с погрешностью ± 20 %.

4. Полученные результаты могут найти применение при разработке теплообменной аппаратуры пониженной материалоемкости и массогабаритных показателей различных энергетических установок, использующих в процессах теплообмена изменение фазового состояния вещества (холодильные установки, тепловые насосы, охладители и т. д.) предприятий энергетики, химической, пищевой, холодильной и электронной промышленности.

Литература

1. Керн, Д. Развитые поверхности теплообмена : пер. с англ. / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 464 с.
2. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высш. шк., 1977. – 352 с.
3. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
4. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2004. – 371 с.

Получено 23.06.2015 г.