

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА И ЭТИЛОВОГО СПИРТА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ С ПРОДОЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

**А.В. ОВСЯННИК, Д.А. ДРОБЫШЕВСКИЙ,
Н.А. ВАЛЬЧЕНКО, М.Н. НОВИКОВ**

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

Введение

Стремление уменьшить массогабаритные параметры теплообменного оборудования приводит к необходимости поисков способов интенсификации теплообмена. Поскольку на его изготовление идут обычно дорогостоящие материалы (медь, латунь и др.), возникает необходимость создания наиболее оптимальной (с точки зрения стоимостных, весовых и габаритных показателей) поверхности теплообмена. Поставленная цель достигается различными способами, обзоры которых приведены в работах [1-2] и других авторов.

Одним из известных способов интенсификации процесса теплообмена при кипении и снижения температуры теплоотдающей поверхности является оребрение. Характеристики и механизм процесса теплообмена при кипении на оребренных поверхностях, выбор геометрических параметров оребрения исследованы недостаточно. Интерес к исследованию теплообмена при кипении ацетона и этилового спирта связан не только с потребностями промышленности, но и с необходимостью определения закономерностей процесса теплообмена при кипении на этих поверхностях.

1. Экспериментальное оборудование

Схема установки приведена в [3]. Рабочая камера изготовлена из нержавеющей стали в виде цилиндра с внутренними размерами: диаметр 107 мм, длина 310 мм. Максимальное рабочее давление 1 МПа. Для визуального наблюдения процесса кипения предусмотрены два смотровых окна диаметром 50 мм. Пар поступал из рабочего объема через теплоизолированную трубу в конденсатор. Теплоотдающей поверхностью являлась дюралюминиевая трубка с продольным типом оребрения, расположенная горизонтально в рабочей камере. Тепловой поток подводился к образцам электрическим нагревателем, установленным в цилиндрической полости образца.

Были исследованы следующие образцы: гладкий полированный, технически шероховатый, продольное прямоугольное оребрение, продольное треугольное оребрение, продольное трапециевидное оребрение. Геометрические параметры образцов приведены в таблице 1.

Уровень жидкости над верхней образующей экспериментальных образцов составлял 40 мм. Температура насыщения жидкости поддерживалась изменением производительности конденсатора. Для измерения температуры использовались хромель-копелевые термопары с толщиной проводников 0,5 мм. Температура насыщения определялась двумя термопарами, размещенными в жидкости и паровом пространстве и контролировалась образцовым манометром. Перепад температуры меж-

ду поверхностью нагрева и рабочей средой измерялся шестью дифференциальными термопарами, один спай которых располагался в образце, а второй – в жидкости.

Таблица 1

Геометрические параметры исследованных образцов

№ образца	d_0 , мм	D_0 , мм	$d_{вн}$, мм	φ_p , град	δ_0 , мм	δ_b , мм	L_0 , мм	N_p , шт	h_p , мм	F_0 , м ²	F_H , м ²	D , мм	
1	25	-	16	-	-	-	302	-	-	0,02372	0,02372	107	
2		-		-	-	-		-					
3		448		36	4	4	310	10	12	0,01310	0,05650		
4											0		0,04578
5											2		0,05102

где d_0 – диаметр образца по основной поверхности; D_0 – наружный диаметр ребра; $d_{вн}$ – внутренний диаметр образца; φ_p – межреберный угол; δ_0 – толщина ребра у его основания; δ_b – толщина у вершины ребра; L_0 – длина образца; N_p – количество ребер; h_p – высота ребра; F_0 – площадь образца по основной поверхности; F_H – полная наружная площадь образца; D – наружный диаметр кольцевого канала.

Сбор и обработка информации производилась автоматизированным комплексом, созданным на базе аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES, программой обработки данных ADC32GD 1.0. Для оценки правильности методики проведения экспериментов и работоспособности конструкции, были проведены опыты по теплообмену при кипении ацетона и этилового спирта на гладких поверхностях. Для осреднения полученных массивов данных принимались серии, состоящие не менее чем из 100 значений. Разброс значений в серии 5 %. Данные этих экспериментов сравнивались с результатами опытов других авторов [4-6]. Сравнение показало, что конструкция рабочего участка и методика проведения эксперимента позволяют получить достоверные данные.

2. Результаты исследования и их анализ

Экспериментальные исследования проводились при давлении насыщения и плотности теплового потока $q = 10 \div 63$ кВт/м². Визуальное наблюдение за процессом кипения ацетона и этилового спирта на горизонтальных трубках показали, что в исследованном диапазоне изменения плотности теплового потока возможны три режима теплообмена: свободная конвекция, неразвитое и развитое кипение. Протяженность областей существования данных режимов зависит от типа внешней поверхности трубы и от давления насыщения. В результате экспериментального исследования установлено влияние ребер на теплообмен при кипении. Сопоставление интенсивности теплообмена при кипении ацетона и этанола на гладких полированных, технически шероховатых и оребренных поверхностях показано на рис. 1. Здесь q -плотность теплового потока в расчете на площадь несущей поверхности образца, $\Delta T = T_{ст} - T_{ж}$ температурный напор. Как показано на графиках (рис. 1 а, б, в, г), коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых жидкостей на оребренных поверхностях α_p значительно выше, чем на полированных и шероховатых ($\alpha_{гл}$), т. е. при пузырьковом режиме кипения теплообмен на оребренных поверхностях в 2 – 3 раза интенсивнее, чем на не развитой поверхности. Отношение $\alpha_p/\alpha_{гл}$ для исследованных образцов возрастает с уменьшением теплового потока, что характерно для работы испарителей холодильных машин [7].

Увеличение интенсивности теплоотдачи при кипении на оребренных трубках связано со своеобразием условий возникновения, роста и отрыва пузырей по сравнению с гладкими. По результатам визуальных наблюдений, процесс кипения на оребренных поверхностях начинался при более низких температурных напорах и плотностях теплового потока, чем на гладкой. Это связано с тем, что на ребристой поверхности, в связи с особенностями теплообмена и гидродинамики, создаются благоприятные условия для зарождения и роста паровых пузырей. Зарождение пузырей происходит у основания ребер. В местах соединения ребер с трубкой имеется наибольший перегрев жидкости, и они хуже смачиваются жидкостью. Именно на этих участках адсорбируются нерастворенные газы, служащие центрами парообразования в начале процесса и при отрыве паровой фазы от поверхности при стабилизированном кипении. Кроме того, ограничение ребрами объемов жидкости вызывает своеобразные турбулентные пульсации при росте, отрыве и подъеме пузырей, которые, в свою очередь, влияют на условия зарождения и рост пузырей, а также на интенсивность теплообмена. В то же время, характер кривых кипения на оребренных трубках определяется геометрией поверхности (рис. 1 а, б, в, г). Так, в области повышенных тепловых потоков ($q > 30 \text{ кВт/м}^2$) наиболее эффективным является прямоугольное оребрение. При определенном соотношении между величинами q и S вся заключенная между ребрами жидкость может оказаться перегретой.

При этом, в работу могут вступать центры с большим радиусом кривизны и улучшаются условия роста пузырей. С ростом тепловой нагрузки ухудшается удаление паровых пузырей из межреберных участков нижней образующей образцов, что, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи, вследствие эффекта «запаривания», что согласуется с данными [8]. Характер кривых кипения (рис. 1 д, е), в значительной мере, зависит от теплофизических свойств исследуемых жидкостей. Так при аналогичных геометрических параметрах образцов и в одинаковых условиях проведения экспериментов, интенсивность теплообмена при кипении ацетона выше, чем при кипении этанола, только при малых плотностях теплового потока ($q < 20 \text{ кВт/м}^2$). При ($q > 20 \text{ кВт/м}^2$) интенсивность теплообмена при кипении ацетона ниже, вследствие различия теплофизических свойств этих жидкостей (в частности, большим отрывным диаметром парового пузыря из-за вдвое меньшей теплоты парообразования у ацетона, что приводит к более быстрому запариванию межреберной поверхности и, как следствие, ухудшению теплоотдачи).

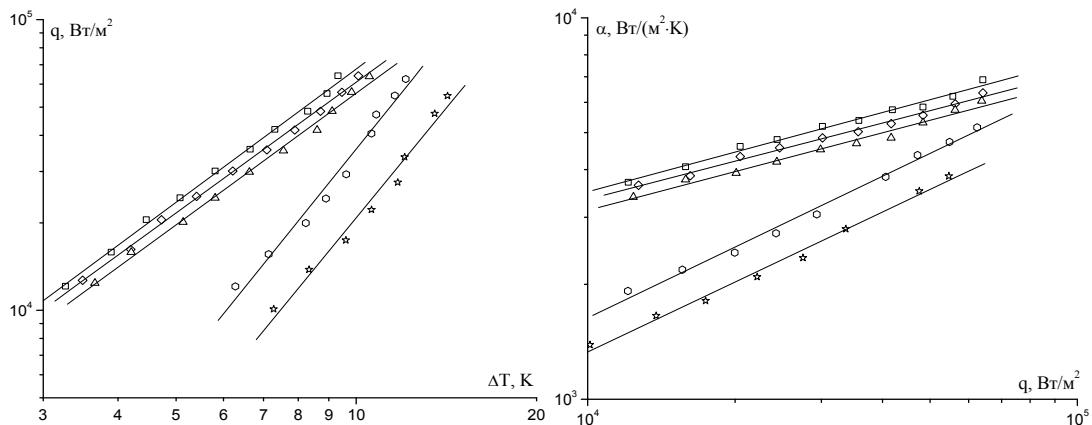
Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования процесса кипения ацетона и этилового спирта на оребренных трубках. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи в 2-3 раза превышают аналогичные величины для гладкой полированной и технически шероховатой поверхностей, что говорит о достаточно высокой эффективности исследованного метода интенсификации теплоотдачи.

2. Выявлены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения. Определено, что в области средних тепловых потоков ($25 \div 35 \text{ кВт/м}^2$) наиболее эффективным является прямоугольное оребрение.

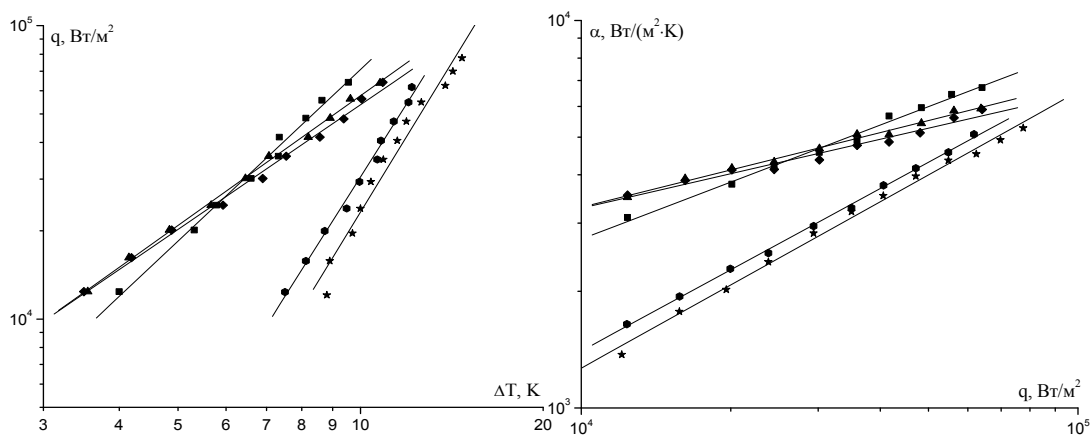
3. Уменьшение расстояния между ребрами интенсифицирует процесс теплообмена в области малых и средних тепловых нагрузок. С повышением тепловых нагрузок усиливается влияние «запаривания» поверхности (в большей степени для прямоугольного оребрения), что приводит к ухудшению теплообмена.

4. Установлено, что в области средних и повышенных тепловых потоков ($q > 20 \text{ кВт/м}^2$) интенсивность теплообмена при кипении ацетона ниже, чем при кипении этилового спирта, вследствие различия теплофизических свойств этих жидкостей.



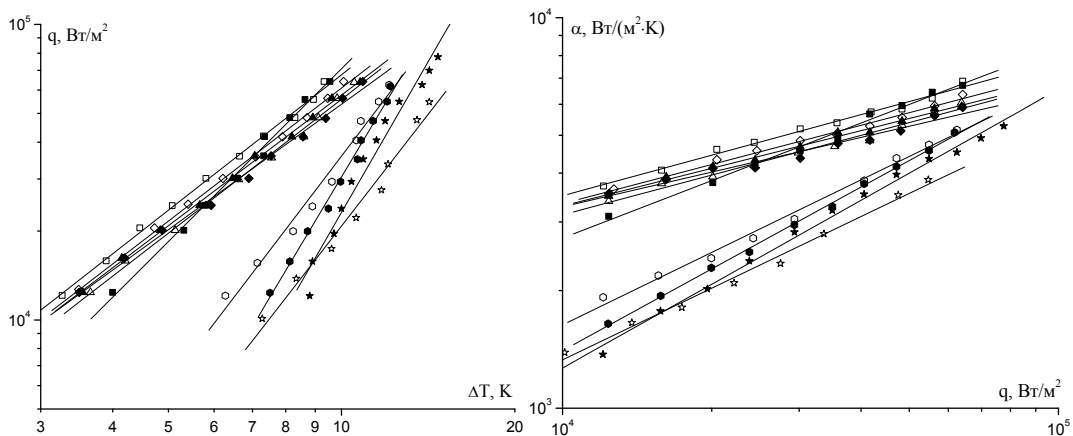
а)

б)



в)

г)



д)

е)

- ☆ , ★ – гладкий полированный;
- , ● – технически шероховатый;
- △ , ▲ – продольное треугольное ребрение;
- ◇ , ◆ – продольное трапецевидное ребрение;
- , ■ – продольное прямоугольное ребрение.

Рис. 1. Сравнение полученных экспериментальных зависимостей при кипении ацетона и этилового спирта на поверхностях с различным профилем ребра (○ – ацетон; ● – этиловый спирт)

Список литературы

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.
2. Ковалев С.А. Исследование механизма, теплообмена и устойчивости кипения обычных и диссоциирующих жидкостей в условиях свободной конвекции на изотермических и неизотермических (ребристых) поверхностях: Автореф. дис. на соискание уч. ст. док. тех. наук. М.: ИВТАН, 1977. – С. 37.
3. Овсянник А.В. Дробышевский Д.А. и др. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2002. – № 2. – С. 31.
4. Ройзен Л.И., Рубин Г.Р. Теплообмен при кипении жидкости на оребренных поверхностях //ИФЖ. – 1972. – Т. 22, № 1. – С.13-18.
5. Данилова Г.Н., Тихонов А.В. Интенсификация теплоотдачи при кипении R113 на поверхностях различного типа //Холодильная техника. – 1984. – № 1 – С. 33-37.
6. Безродный М.К., Сосновский В.И. Определение оптимальных параметров оребрения поверхности, охлаждаемой кипящей жидкостью //ИФЖ. – 1976. – Т. 31, № 1. – С. 142–143.
7. Дюндин В. А. Исследование теплообмена при кипении фреона – 12 на гладкой и ребристых трубках //Холодильная техника. – 1969, № 11.
8. Gorenflo D. «Chem. – Ing.Techn», 1968, Bd. – 40, № 15.

Получено 24.06.2003 г.