

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА И ЭТАНОЛА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование и выполнен анализ влияния параметров оребрения на теплообмен при кипении ацетона и этанола при атмосферном давлении в диапазоне тепловых потоков $q = 8 - 63 \text{ кВт/м}^2$. Получены критериальные уравнения, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи с оребренной поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности режимы работы испарителей характеризуются низкими температурными напорами и малыми плотностями тепловых потоков. Стремление уменьшить массогабаритные параметры испарительных аппаратов приводит к необходимости поисков способов интенсификации теплообмена при низких температурных напорах. Поставленная цель достигается различными способами, обзоры которых приведены в работах [1, 2 и др.]. Необходимо отметить, что при выборе для практического применения того или иного метода интенсификации теплообмена приходится учитывать не только эффективность самой поверхности, но и ее универсальность для различных теплоносителей, технологичность изготовления поверхности, технологичность сборки теплообменного аппарата, прочностные требования, загрязняемость поверхности, особенности эксплуатации и т.д. Поэтому, по совокупности предъявляемых требований, наибольшее распространение в теплообменных аппаратах, применяемых современной промышленностью, получили оребренные поверхности различных типов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для исследований теплообмена при кипении жидкостей в ГНУ ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ был создан специальный экспериментальный стенд, схема которого и методика проведения экспериментов подробно описаны в [3]. Экспериментальные образцы представляли собой дюралюминиевые горизонтальные оребренные трубы, изготовленные фрезерованием. Для измерения температурного напора на поверхности экспериментальных образцов у основания, в среднем сечении ребер и на их вершинах зачеканивались хромель-копелевые дифференциальные термодпары с диаметром проводников 0,5 мм. Экспериментальные данные регистрировались и обрабатывались с помощью автоматизированной системы измерений, созданной на базе аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES, про-

граммой обработки данных ADC32GD 1.0. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи превышала 15%. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследованных образцов

№	Тип ребра	d_r/d_c , мм	h , мм	s , мм	δ_s / δ_0	L_{op} , мм	L_o , мм
Продольное оребрение							
1	треуг.	47/25	11	4.33	0/4	280	310
2	трапец.	47.5/25	11.25		2/4		
3	прям.				4/4		
Поперечное оребрение							
4	треуг.	50/25	12.5	4	0/4	284	310
5	трапец.				2/4		
6	параб.				2/4		
7	прям.				2/2		

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование интенсивности теплоотдачи при кипении ацетона и спирта при атмосферном давлении проводилось в диапазоне тепловых потоков $8 - 63 \text{ кВт/м}^2$. Величина температурного напора между теплоотдающей поверхностью и жидкостью является определяющим параметром (при прочих равных условиях), характеризующим интенсивность теплообмена между данной поверхностью и средой. Поэтому исследование подводящего теплового потока на градиент температуры в различных точках оребренной поверхности позволило выявить качественное и количественное влияние этого параметра на теплообмен при кипении.

Тепловой поток, подводимый электрическим нагревателем, делился на тепловой поток через поверхность между ребрами и тепловой поток у основания ребер:

$$Q_3 = Q_{mp} + Q_p,$$

$$\text{где } Q_p = Q \cdot \frac{F_p}{F_0} \text{ и } Q_{mp} = Q \cdot \frac{F_{mp}}{F_0};$$

F_0 – площадь основной поверхности; соответственно плотности теплового потока на ребре и межреберной поверхности

$$q_p = \frac{Q_p}{F_p} \text{ и } q_{mp} = \frac{Q_{mp}}{F_{mp}}.$$

На рис. 1, 2 приведены зависимости температурного напора по элементам оребренной поверхности от подводимой тепловой мощности при кипении ацетона.

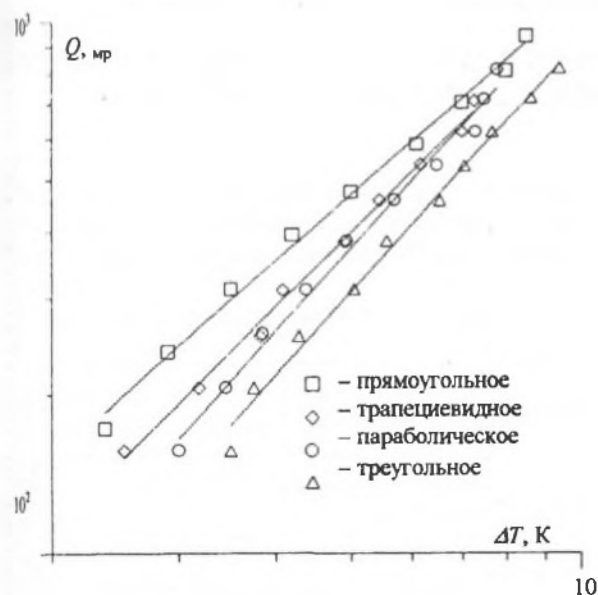


Рис.1. Экспериментальные зависимости среднего температурного напора основной поверхности от теплового потока, отводимого межреберной поверхностью, для поперечного оребрения при кипении ацетона

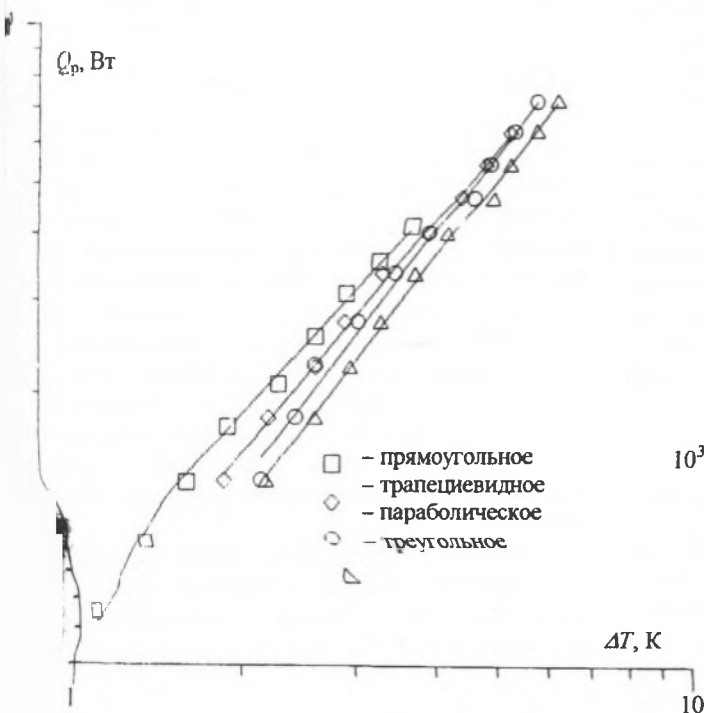


Рис.2. Экспериментальные зависимости среднего температурного напора по ребру от теплового потока отводимого ребром для поперечного оребрения при кипении ацетона

При кипении на оребренной поверхности с прямоугольным профилем ребра как для продольного, так и для поперечного типов оребрения были получены более низкие значения градиентов температур. Это не противоречит известной тенденции снижения температурного напора с увеличением площади поверхности теплообмена.

По полученным значениям ΔT были определены коэффициенты теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока по элементам оребренной поверхности. В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что средние коэффициенты теплоотдачи по ребру слабо зависят от профиля ребра при свободном отводе паровой фазы, причем для продольного типа оребрения отличие крайне незначительно (рис. 3, 4).

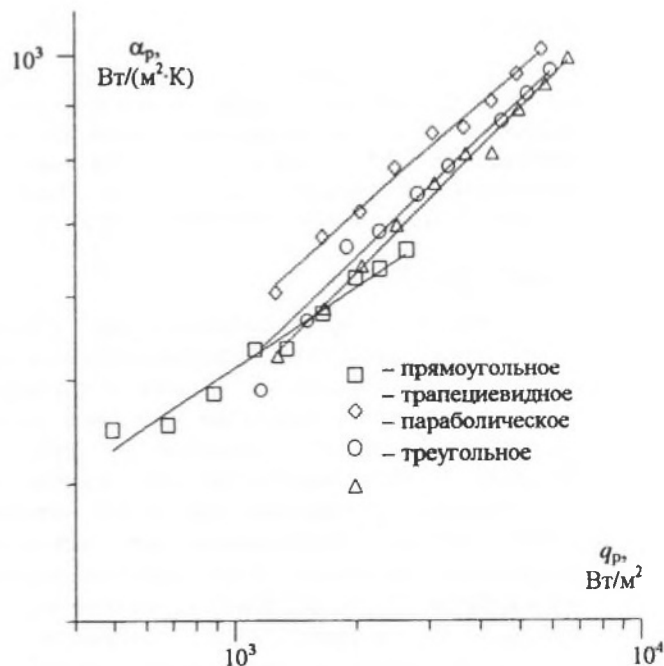


Рис.3. Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока, отводимого ребрами для поперечного оребрения при кипении ацетона

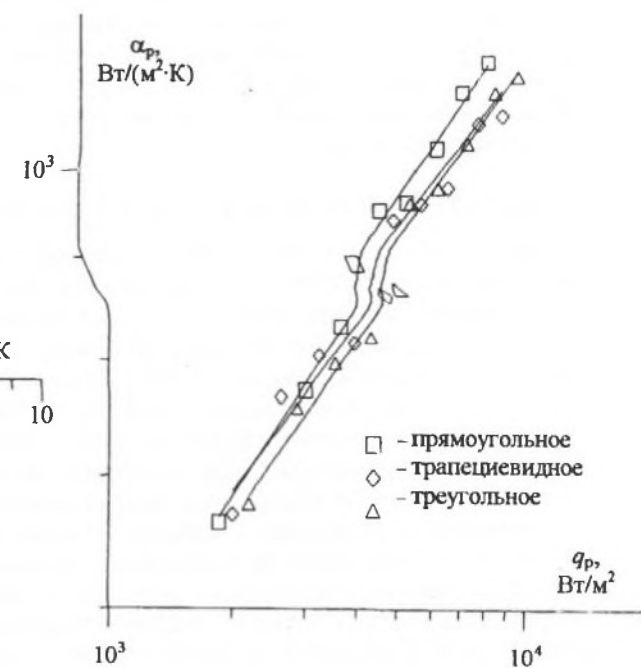


Рис.4. Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока на ребре для продольного типа оребрения при кипении этанола

На рис. 5, 6 приведены зависимости коэффициентов теплоотдачи (при температурном напоре по основной поверхности) от плотности теплового потока на основной поверхности образца (цилиндра), при кипении ацетона и спирта для всех типов исследованных оребренных и гладких поверхностей. Такое сравнение представляется более корректным, поскольку позволяет судить об эффективности исследованных типов оребрения.

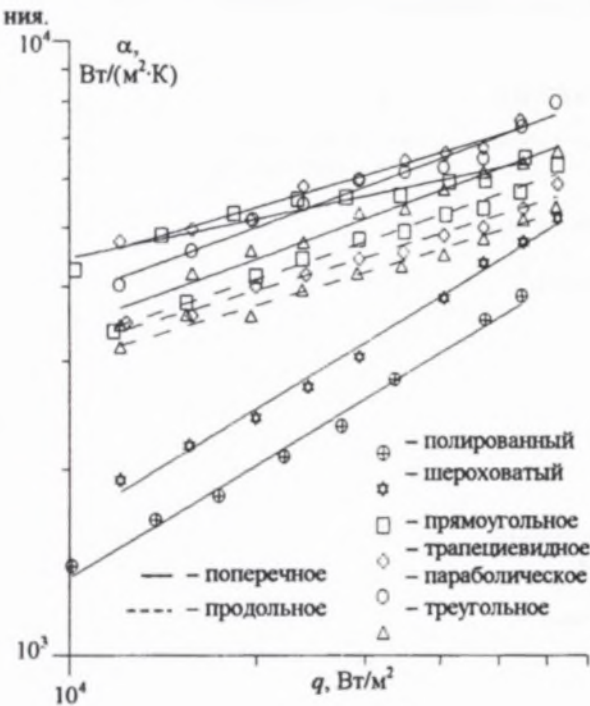


Рис. 5. Зависимости коэффициентов теплоотдачи основной поверхности от плотности теплового потока на основной поверхности образца для ацетона

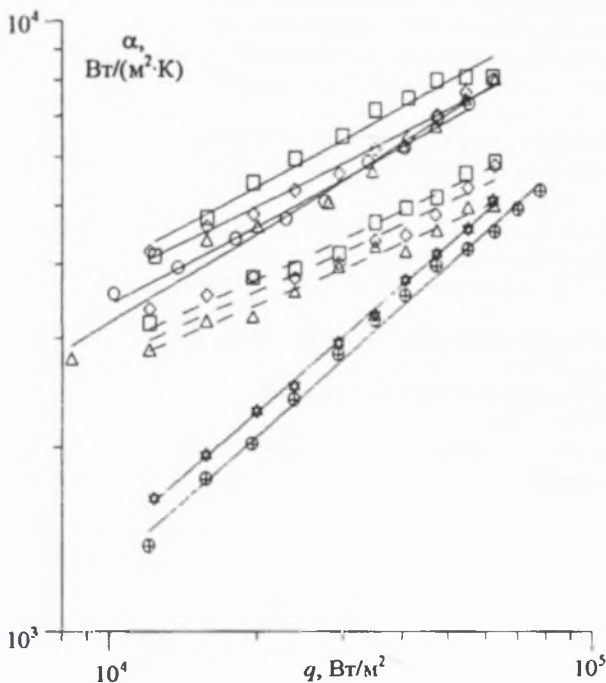


Рис. 6. Зависимости коэффициентов теплоотдачи основной поверхности от плотности теплового потока на основной поверхности образца для этанола (обозначения см. на рис. 5)

Как видно из рис. 5 и 6, характер кривых кипения в значительной мере определяется теплофизическими

свойствами жидкости. Так, при аналогичных геометрических параметрах образцов и в аналогичных условиях проведения экспериментов интенсивность теплообмена при кипении ацетона выше, чем при кипении спирта 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, что объясняется различием теплофизических свойств этих жидкостей (в частности, большим отрывным размером парового пузыря из-за вдвое меньшей теплоты парообразования у ацетона, что приводит к более быстрому запариванию межреберной поверхности и, как следствие, ухудшению теплоотдачи).

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, для расчета теплоотдачи с оребренной поверхности в инженерных расчетах используется приведенный коэффициент теплоотдачи [4]:

$$\alpha_{\text{прив}} = \alpha_p \cdot E \cdot \frac{F_p}{F_{\text{мп}} + F_p} + \alpha_{\text{мп}} \cdot \frac{F_{\text{мп}}}{F_{\text{мп}} + F_p}, \quad (4)$$

где $E = \frac{\text{th}\left(\frac{h_p}{\delta_0} \sqrt{2\text{Bi}}\right)}{\frac{h_p}{\delta_0} \sqrt{2\text{Bi}}}$ – коэффициент эффективности ребра;

$\text{Bi} = \frac{\alpha_p (F_p / P_p)}{\lambda_m}$ – приведенный критерий Био;

P_p – периметр ребра.

Для определения коэффициентов теплоотдачи с ребра и межреберной поверхности было использовано известное уравнение В.И. Толубинского [5], описывающее известные данные по теплообмену при кипении в большом объеме неметаллических жидкостей на гладкой поверхности:

$$\text{Nu} = C K^m \text{Pr}^n, \quad (5)$$

где значения C, m, n – находятся на основании экспериментальных данных.

В качестве параметра учитывающего форму и размеры ребра предлагается использовать функцию профиля ребра [6] отнесенную к высоте ребра:

$$X = \frac{f_p(x)}{h_p}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (5) перепишем в виде

$$\text{Nu}_p = C X^b K_p^m \text{Pr}^n, \quad (7)$$

где $C = 21, b = -0.1, m = 0.3, n = -0.2$.

Результаты экспериментов описываются полученной зависимостью с погрешностью $\pm 15\%$, что иллюстрируется на рис. 7.

При обобщении экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи на межреберной поверхности также было использовано уравнение (5)

$^{11} Nu_p Pr^{0.2}$

- ◇ ○ Δ — поперечное ацетон
- продольное ацетон
- ◆ ▲ — поперечное этанол
- ◇ ○ ▲ — продольное этанол
- ◆ ▼ — продольное этанол

квадраты — прямоугольное
ромбы — трапециевидное
окружности — параболическое
треугольники — треугольное



с.7. Обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи на ребре по уравнению (7)

олучены следующие зависимости:
оперечного типа оребрения

$$K_{mp} = 115 \cdot K_{mp}^{0.4} Pr^{0.2}; \quad (8)$$

родольного типа оребрения

$$K_{mp} = 85 \cdot K_{mp}^{0.4} Pr^{0.2}. \quad (9)$$

ичие значения константы C для продольного ребрения можно объяснить ухудшением условия парообразования с нижней поверхности об- вследствие запаривания поверхности из-за зного расположения ребер. Погрешность оп- ния α_{mp} , также не превысила $\pm 15\%$.

ДЫ

гучены качественные и количественные зави- и температурного напора от подводимой мощ- и плотности теплового потока при кипении а и этилового спирта при атмосферном давле- оребренной поверхности.

ольшие значения коэффициентов теплоотдачи, ы превышающие аналогичные значения для ше- ой и в 3 – 4 раза для полированной поверхно- ли получены для образца с поперечным пря- м оребрением.

ектально определено, что при горизон- орении труб поперечное оребрение в ы эффективнее продольного, вследствие

большого развития поверхности теплообмена и луч- ших условий отвода паровой фазы.

Получены эмпирические критериальные уравне- ния для расчета интенсивности теплоотдачи элемен- тов оребренной поверхности при кипении ацетона и этилового спирта при атмосферном давлении, описы- вающие результаты экспериментальных исследований с погрешностью $\pm 15\%$, т.е. не превышающей погреш- ность эксперимента.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГНУ ИТМО НАНБ — сокращенное название Государствен- ного научного учреждения Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

d — диаметр, мм;

F — площадь поверхности, м²;

h — высота ребра, мм;

L — длина, мм;

p — давление, Н/м²;

s — шаг ребра, мм;

T — температура, град.

q — плотность теплового потока, Вт/м².

Индексы:

в — вершина ребра;

mp — межреберная поверхность;

н — условия насыщения;

о — основная поверхность;

op — оребренная поверхность;

r — ребро;

с — стенка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова Г.Н., Тихонов А.В. Экспериментальное ис- следование теплообмена при кипении холодильных агентов на интенсифицированных поверхностях тепло- обмена // Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен: Тр. Первой Российской национальной конф. по теплообмену (М., ноябрь 1994). – М.: Издательство МЭИ, 1994. Т. 4. – С. 91-95.
2. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидроди- намика и теплообмен при парообразовании. – М.: Выс- шая школа, 1986. – 448 с.
3. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с попереч- ным оребрением в кольцевом канале / А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский и др. // Вестник ГТТУ. 2002. № 2. – С. 31-37.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел. Теплопереда- ча. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
5. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980. – 316 с.
6. Керн Д., Краус А. Разъитые поверхности теплообмена. Пер. с. англ. М.: Энергия, 1977. – 464 с.