

УДК 536.24

*А. В. Овсянник, М. Н. Новиков*Гомельський державний технічний університет ім. П.О. Сухого, 246746  
Беларусь, Гомель, пр. Октябрия, 48**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА И ЭТИЛОВОГО СПИРТА НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Экспериментальное исследование интенсивности теплоотдачи при кипении ацетона и этилового спирта на горизонтальных трубах с поперечным и продольным оребрением при атмосферном давлении в условиях свободного движения проведено в диапазоне тепловых потоков  $8 - 63 \text{ кВт/м}^2$ . Выполнен сравнительный анализ влияния типа и геометрии оребренной поверхности. Получены полуэмпирические критериальные уравнения, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении ацетона и этилового спирта на оребренной поверхности в исследованном диапазоне тепловых потоков. **Ключевые слова:** теплоотдача, кипение, оребренная поверхность, ацетон, этиловый спирт, критериальное уравнение.*

**I. ВВЕДЕНИЕ**

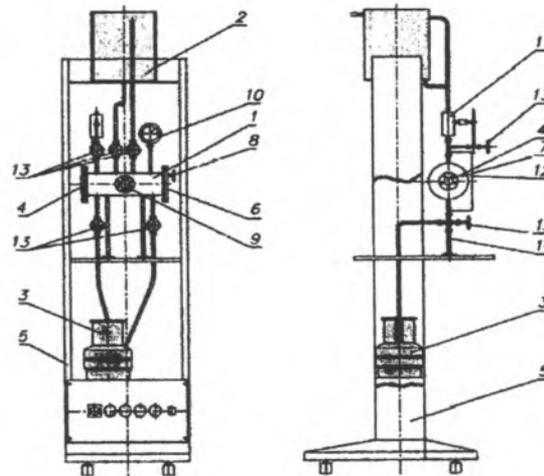
Существующие в настоящее время способы интенсификации теплообмена при кипении на теплоотдающей поверхности можно разделить на несколько групп: структурированные поверхности, оребрение, пористые покрытия. Необходимо отметить, что при выборе для практического применения того или иного метода интенсификации 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. [1, 2 и др.]. По совокупности выше перечисленных требований наибольшее распространение в теплообменных аппаратах, применяемых современной промышленностью, получили оребренные поверхности различных типов.

Особенностью условий теплообмена при кипении на оребренной поверхности является неизо-

термичность теплоотдающей поверхности. Из-за конечной теплопроводности ребра на его поверхности устанавливается температурное поле, характеризующееся снижением температуры от основания ребра к его вершине. Вследствие этого на ребре могут сосуществовать различные режимы кипения, что значительно затрудняет расчет теплоотдачи. В настоящее время не существует аналитических методов, позволяющих надежно рассчитать интенсивность теплообмена при развитом кипении на такой поверхности, поэтому практическое значение приобретают полуэмпирические зависимости, подтвержденные экспериментально.

**II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Для исследований теплообмена при кипении жидкостей в ГНУ ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ был создан специальный экспериментальный стенд, схема которого показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка:

1 — рабочая камера; 2 — конденсатор; 3 — баллон с рабочей жидкостью; 4, 9 — иллюминатор; 5 — стойка; 6, 7 — фланцы; 8 — вывод терморпар; 10 — манометр; 11 — клапан предохранительный; 12 — защитный экран; 13 — вентиль; 14 — стойка рабочей камеры

Рабочая испарительная камера 1 представляет собой цилиндр, закрытый фланцами 6 и 7. Фланец 7 имеет стеклянный иллюминатор для подсветки фонарем. На фланце 6 смонтирован разъем 8 для подвода термопар. Посреди камеры предусмотрен смотровой иллюминатор 9 для визуального наблюдения процесса кипения на поверхности образца. Водяной теплообменник-конденсатор 2 выполнен в виде емкости, в которой установлены два змеевика, и служит для поддержания стационарных условий проведения эксперимента. Для хранения рабочей жидкости служит баллон 3. На

рабочей камере установлен манометр 10, предохранительный клапан 11, вентиль 13 — для подачи в камеру воздуха при проверке на герметичность, при замене образца и вывода паров рабочей жидкости (токсичных).

Экспериментальные образцы представляли собой дюралюминиевые горизонтальные оребренные трубы, изготовленные фрезерованием. Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов

№ п/п	Тип ребра	$d_n/d_o$ , мм	$h$ , мм	$s$ , мм	$\delta_n/\delta_o$	$L_{op}$ , мм	$L_o$ , мм	$n$ , шт.
Продольное оребрение								
1	треугольное	47/25	11	4.33	0/4	280	310	10
2	трапециевидное	47.5/25	11.25		2/4			
3	прямоугольное				4/4			
Поперечное оребрение								
4	треугольное	50/25	12.5	4	0/4	284	310	36
5	трапециевидное				2/4			
6	параболическое				2/4			
7	прямоугольное				2/2	278	47	

Перед установкой образца внутренние стенки экспериментальной камеры и теплообменная поверхность протирались этанолом или ацетоном. После герметизации из камеры с помощью форвакуумного насоса удалялся воздух. Экспериментальная камера заполнялась рабочей жидкостью. Уровень жидкости над верхней образующей составлял ~50 мм, что обеспечивало независимость интенсивности теплообмена при кипении относительно столба жидкости над поверхностью нагрева [3]. Перед проведением эксперимента для удаления пузырьков неконденсирующихся газов образцы кипятились в течение нескольких часов. После отключения тепловой нагрузки, прекращения кипения на поверхности образцов и установления условий эксперимента включался нагреватель для подвода теплового потока к поверхности исследуемого образца. Условия насыщения в экспериментальной камере поддерживались регулированием расхода охлаждающей жидкости через конденсатор. Температура насыщения определялась двумя термопарами, размещенными в жидкости и паровом пространстве. Контроль давления насыщения осуществлялся с помощью образцового манометра. Для измерения температурного напора на

поверхности экспериментальных образцов у основания, в среднем сечении ребер и на их вершинах зачеканивались хромель-копелевые дифференциальные термопары 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, программой обработки данных ADC32GD 1.0. Измерительная система работала в циклическом режиме опроса термопар через определенный промежуток времени. Скорость опроса составляла 10 измерений в секунду. Длительность выхода температуры поверхности нагрева на стационарный режим колебалась от 15 до 60 минут. После достижения установившегося режима теплообмена, определяемого по выводимым данным на дисплей, производилась регистрация показаний термопар. Затем изменялась величина подводимого теплового потока, и процедура повторялась для следующей экспериментальной точки. Экспериментальные исследования проводились при постепенном увеличении тепловой нагрузки до достижения максимально возможной ее величины, потом тепловой поток плавно уменьшался.

Погрешность определения коэффициента теплоотдачи, определенная по методикам [4, 5], не превышала 15 %.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование интенсивности теплоотдачи при кипении ацетона и этилового спирта на оребренной поверхности при атмосферном давлении в условиях свободного движения проведено в диапазоне тепловых потоков 8 – 63 кВт/м<sup>2</sup>. 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 влияния подводимого 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, передаваемый межреберной поверхностью, и тепловой поток через основание ребер:

$$Q = Q_{mp} + Q_p \quad (1)$$

где

$$Q_p = Q \cdot \frac{F_0 - F_{mp}}{F_0} \text{ и } Q_{mp} = Q \cdot \frac{F_{mp}}{F_0} \quad (2)$$

$F_0$  — площадь основной (несущей) поверхности.

Соответственно определялись плотности теплового потока на ребрах и межреберной поверхности:

$$q_p = \frac{Q_p}{F_p} \text{ и } q_{mp} = \frac{Q_{mp}}{F_{mp}} \quad (3)$$

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

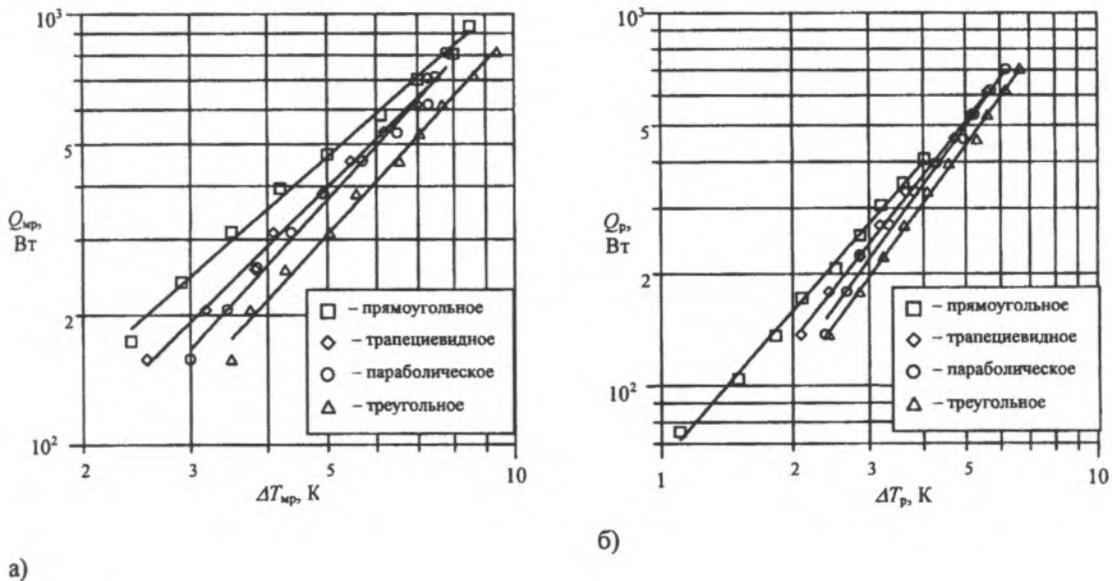


Рис.2. Экспериментальные зависимости среднего температурного напора основной поверхности от теплового потока, отводимого межреберной поверхностью (а) и ребром (б) для поперечного оребрения при кипении ацетона

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  $\Delta T$  были определены коэффициенты теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока по элементам оребренной поверхности. На рис. 3 представлены характерные зависимости для ребер.

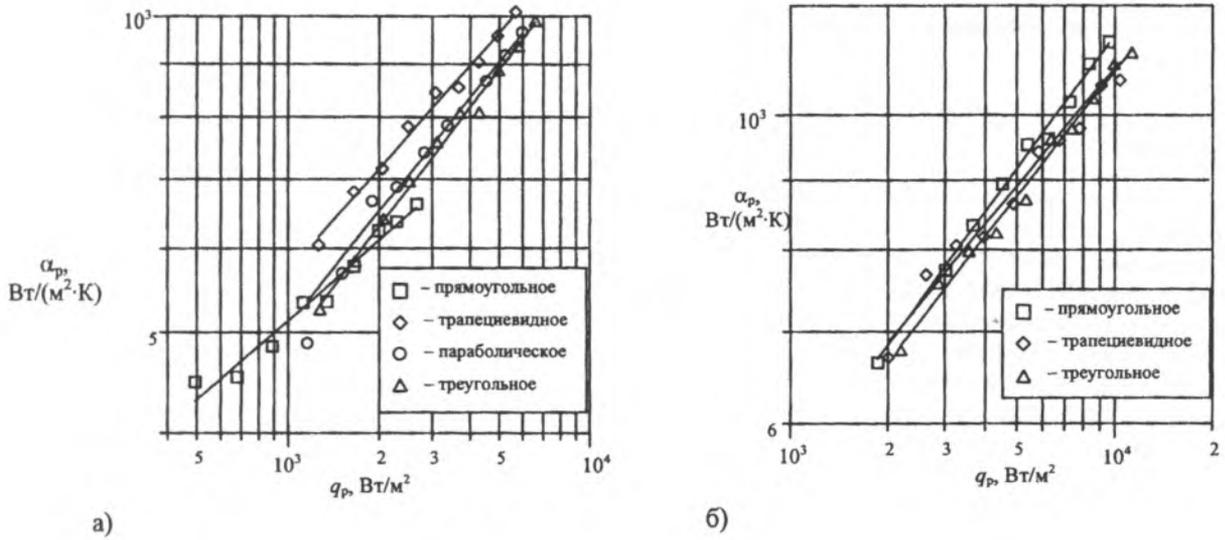


Рис.3. Зависимости среднего коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока, отводимого ребром: а) для поперечного оребрения при кипении ацетона; б) для продольного оребрения при кипении этилового спирта

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что средние коэффициенты теплоотдачи по ребру при развитом пузырьковом кипении слабо зависят от профиля ребра при достаточно свободном отводе паровой фазы, причем для продольного типа оребрения отличие крайне незначительно.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов теплоотдачи (при температурном напоре по

основной поверхности) от плотности теплового потока на основной поверхности образца (цилиндра), при кипении ацетона и этилового спирта для всех типов исследованных оребренных и гладких поверхностей. Такое сравнение представляется более корректным, поскольку позволяет судить об эффективности исследованных оребренных поверхностей.

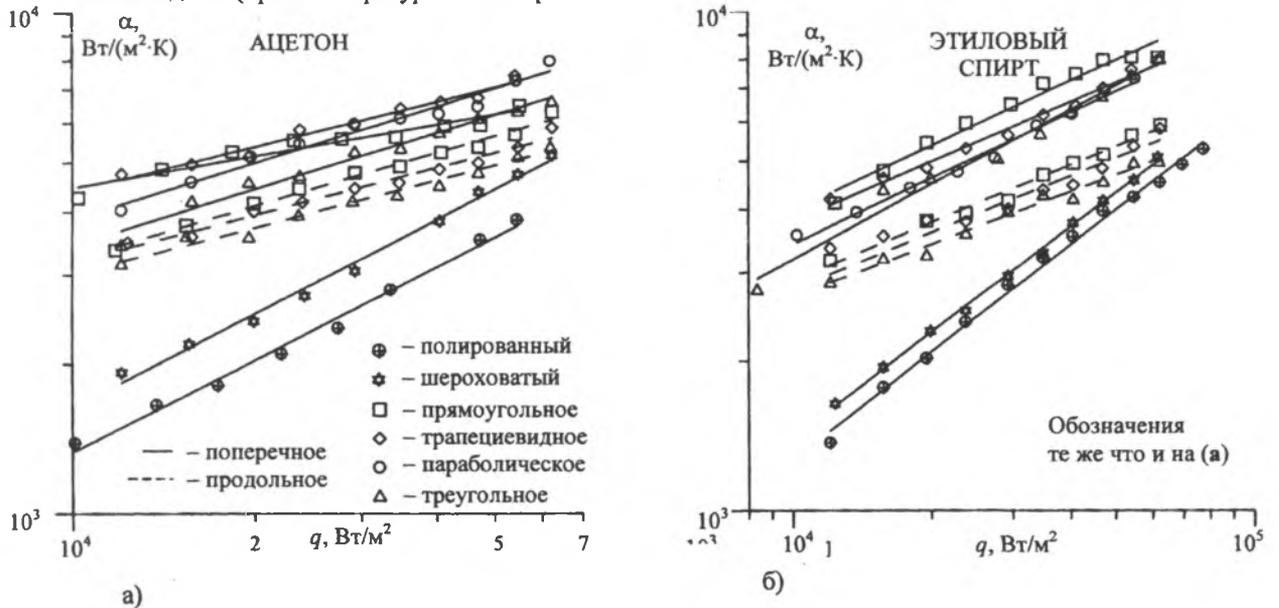


Рис.4. Зависимости коэффициентов теплоотдачи основной поверхности от плотности теплового потока на основной поверхности образца для ацетона (а) и этилового спирта (б)

Как видно из рис. 4, 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 за-

париванию межреберной поверхности и, как следствие, ухудшению теплоотдачи.

#### IV. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При расчете теплоотдачи с оребренной поверхности обычно определяется приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{прив}$ :

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

где  $E$  — коэффициент эффективности ребра.

Следовательно, задача заключается в определении коэффициентов теплоотдачи по элементам оребренной поверхности  $\alpha_p$  и  $\alpha_{мп}$ .

При анализе и решении задачи об интенсивности теплообмена при кипении жидкостей на оребренных поверхностях необходимо решить вопросы, касающиеся выбора независимых переменных, влияющих на теплообмен, и установить степень их влияния. В целях упрощения задачи из всего многообразия условий, в которых может протекать процесс теплообмена при кипении, вполне допустимо выделить режим, в пределах которого устанавливаются характерные для него соотношения между параметрами, определяющими доминирующее влияние того или иного механизма переноса теплоты (или совместное их влияние) на интенсивность теплообмена.

Процесс теплоотдачи на оребренной поверхности при развитом кипении на ребре можно рассматривать, как теплоотдачу при пузырьковом кипении в условиях естественной конвекции на теплоотдающих поверхностях, имеющих различную ориентацию в пространстве, и зависимость для определения интенсивности теплообмена в общем виде может быть записана, как [6]:

$$Nu = f(Pr, Fo, Pr). \quad (5)$$

Для ребра данное уравнение можно записать:

$$Nu = f(Pr, Fo, Pr, X), \quad (6)$$

где  $X$  — параметр учитывающий профиль ребра.

Процесс теплообмена при кипении отличается от конвективного теплообмена существованием двухфазного пристенного слоя. В этом случае необходимо учитывать действие поверхностных сил, которые можно учесть с помощью капиллярной постоянной жидкости. Тогда определяемый критерий Нуссельта для теплоотдающей поверхности будет [6]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda_{ж}}. \quad (7)$$

В качестве характерного линейного размера, по мнению авторов [6, 7], можно принять среднее

значение отрывного диаметра пузыря  $d_0$ , значение которого можно считать практически не зависящими от плотности теплового потока  $q$  в широком диапазоне изменения последнего. В результате критериальное уравнение в общем виде может быть записано в виде:

$$Nu = f(K, Pr, X), \quad (8)$$

где

$$K = Pe \cdot Fo = \frac{q}{r \rho_n d_0 f} = \frac{q}{r \rho_n \omega^n}. \quad (9)$$

Здесь  $d_0$  — отрывной диаметр пузыря;  $f$  — частота отрыва паровых пузырей;  $\omega^n$  — скорость роста паровых пузырей, характеризующая среднюю скорость роста последних в данной точке и паропроизводительность одного центра парообразования, которую можно рассчитать по формуле [6]:

$$\omega^n = 0,36 \cdot 10^{-3} \cdot \pi^{-1,4}, \quad (10)$$

где  $\pi = p/p_{кр}$  — приведенное давление.

В качестве параметра, учитывающего форму и размеры ребра, предлагается использовать функцию профиля ребра [8], отнесенную к высоте ребра:

$$X = \frac{f_p}{h_p}, \quad (11)$$

где  $f_p = \frac{\delta_0}{2} \left( \frac{x}{h_p} \right)^{(1-2n)/(1-n)}$ ,  $x$  — текущая координата.

В результате независимая переменная, характеризующая геометрические характеристики ребра, будет:

для прямоугольного —  $X = \frac{\delta_0}{2 \cdot h_p}$ ; для трапеци-

видного —  $X = \frac{\delta_0}{8 \cdot h_p}$ ; для параболического —

$X \approx \frac{\delta_0}{6 \cdot h_p}$ ; для треугольного —  $X = \frac{\delta_0}{4 \cdot h_p}$ .

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче на ребре по формуле (6) было получено следующее уравнение:

$$Nu_p = 21 \cdot X^{-0,1} K_p^{0,3} Pr^{-0,2}, \quad (12)$$

Результаты опытов описываются полученной зависимостью с погрешностью  $\pm 15\%$  (рис. 5), что подтверждает корректность выбранного метода. Причем данная зависимость справедлива как для продольного, так и для поперечного типов ребер.

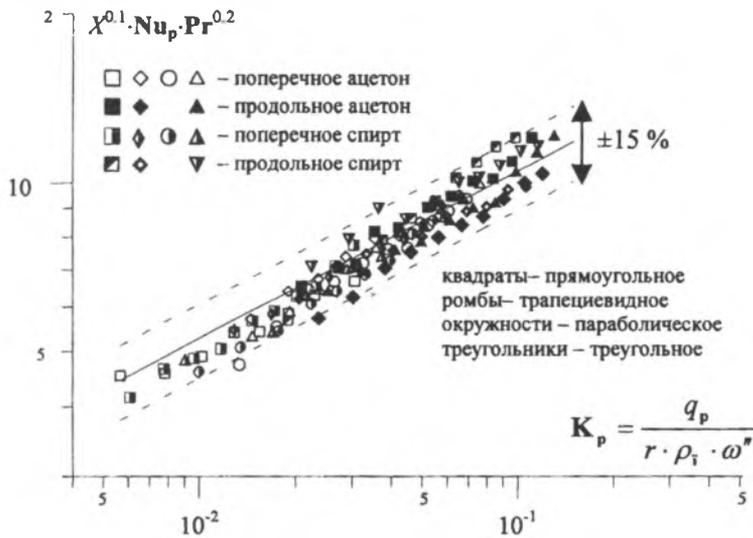


Рис.5. Обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи на ребре.

При обобщении экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи на межреберной поверхности по уравнению (5) получены следующие зависимости:

— для поперечного типа оребрения:

$$Nu_{mp} = 115 \cdot K_{mp}^{0,4} Pr^{-0,2}, \quad (13)$$

— для продольного типа оребрения:

$$Nu_{mp} = 85 \cdot K_{mp}^{0,4} Pr^{-0,2}, \quad (14)$$

Отличие в значениях константы  $C$  можно объяснить ухудшением условий отвода паровой фазы с нижней поверхности образцов вследствие запаривания поверхности из-за продольного расположения ребер. Погрешность определения  $\alpha_{mp}$  также не превышает  $\pm 15\%$ .

## V. ВЫВОДЫ

Получены качественные и количественные зависимости температурного напора от подводимой мощности и плотности теплового потока при кипении ацетона и этилового спирта при атмосферном давлении на оребренной поверхности.

Наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи, в 2,5 раза превышающие аналогичные значения для шероховатой и 3 – 4 раза для полированной поверхности, были получены для образца с поперечным прямоугольным оребрением.

Экспериментально определено, что при горизонтальном расположении труб поперечное оребрение в 1,5 раза эффективнее продольного при одинаковых профилях ребра вследствие большего развития поверхности теплообмена и лучших условий отвода паровой фазы.

Интенсивность теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении на ребре практически не зависит от профиля ребра при прочих равных условиях.

Получены полуэмпирические критериальные уравнения для расчета интенсивности теплоотдачи элементов оребренной поверхности при кипении

ацетона и этилового спирта при атмосферном давлении, описывающие результаты экспериментальных исследований с погрешностью  $\pm 15\%$ .

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  — толщина, мм;  $d$  — диаметр, мм;  $F$  — площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  $h$  — высота ребра, мм;  $L$  — длина, мм;  $p$  — давление, Н/м<sup>2</sup>;  $s$  — шаг ребра, мм;  $T$  — температура, К;  $Q$  — тепловой поток;  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>; **Индексы:**  $v$  — вершина ребра;  $mp$  — межреберная поверхность;  $n$  — условия насыщения;  $o$  — основная поверхность;  $or$  — оребренная поверхность;  $r$  — ребро;  $s$  — стенка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Г. Н., Тихонов А. В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении холодильных агентов на интенсифицированных поверхностях теплообмена // Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен: Тр. Первой Российской национальной конференции по теплообмену (М., Россия, ноябрь 1994). — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — Т. 4. — С. 91 – 95.
2. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшии Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. — М.: Высшая школа, 1986. — 448 с.
3. Толубинский В. И., Антоенко В. А., Островский Ю. П. Изменение числа действующих центров парообразования в зависимости от высоты слоя жидкости // ИФЖ. — 1977. — Т. 32, №1. — С. 13 – 17.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972. — 381 с.
5. Теория и техника теплофизического эксперимента /Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников, И.С. Идиатуллин и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 360 с.
6. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980. — 316 с.
7. Перкинс А., Уэстуотер Дж. Вопросы физики кипения. — М.: Мир, 1964. — С.258-281.
8. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. Пер. с англ. — М.: Энергия. — 1977. — 464 с.