

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА И ЭТАНОЛА НА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ

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

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

Введение

Интенсификация теплообмена является эффективным путем решения проблемы уменьшения массы и габаритных размеров теплообменных аппаратов и устройств. Предложены и исследованы разнообразные методы интенсификации теплообмена [1–3, 5].

Применительно к течению однофазных теплоносителей используются: турбулизаторы потока на поверхности; шероховатые поверхности; развитые поверхности в результате оребрения; закрутка потока спиральными ребрами, шнековыми устройствами, завихрителями, установленными на входе в канал; подмешивание к потоку жидкости газовых пузырей, а к потоку газа – твердых частиц или капель жидкости; вращение поверхности теплообмена; вибрация поверхности; пульсация теплоносителя; воздействие на поток электростатических полей; отсос потока из пограничного слоя. Наряду с турбулизаторами, закручивающими устройствами, оребрением для интенсификации теплообмена при кипении используют также низкотеплопроводные и 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 технологичность ее изготовления, технологичность сборки теплообменного аппарата, прочностные требования, загрязняемость поверхности, особенности эксплуатации и т. д. Одним из методов, удовлетворяющих совокупности предъявляемых требований, является оребрение поверхности.

С помощью данного метода интенсификации теплообмена можно добиться существенного улучшения характеристик теплообменных аппаратов и устройств, включая уменьшение металлоемкости, габаритных размеров, температуры поверхностей, рост надежности и ресурса работы.

1. Условия проведения эксперимента

1.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, предназначенная для проведения лабораторного исследования процессов кипения жидкостей в горизонтальном кольцевом канале на поверхностях различной геометрии, состояла из: рабочей камеры, водяного теплообменника-конденсатора, баллона с рабочей жидкостью. Рабочая испарительная камера представляла собой стальной цилиндр, со стеклянными иллюминаторами для визуальных наблюдений за процессом кипения на поверхности образца. На рабочей камере был установлен манометр и предохранительный клапан.

Необходимое давление в кольцевом канале обеспечивалось конденсатором, поддерживающим уровень давления за счет изменения расхода охлаждающей жидкости (воды). Конденсатор был выполнен в виде герметичного вертикального цилиндра из

нержавеющей стали, с набранной внутри необходимой поверхностью теплообмена, представляющую собой змеевики из трубок с условным проходом 10 мм.

Тепловой поток к образцу подводился с помощью электронагревателя сопротивления от стабилизированного источника постоянного тока. Более подробно экспериментальная установка описана в [4].

1.2. Изготовление экспериментальных образцов

Экспериментальные образцы изготавливались из дюралюминия Д-16, как материала обладающего приемлемыми теплофизическими и химическими свойствами, путем токарно-фрезерной обработки. Проводились исследования на следующих образцах:

1. Гладкий полированный.
2. Гладкий шероховатый.
3. Поперечное прямоугольное оребрение.
4. Поперечное треугольное оребрение.
5. Поперечное трапециевидное оребрение.
6. Поперечное вогнутое параболическое оребрение.

Геометрические параметры образцов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры исследованных образцов

Тип образца	d_n , мм	h , мм	s , мм	$\delta_{вер}$ / $\delta_{осн}$	$L_{ороб}$, мм	$L_{образ}$, мм	n , шт	D , мм	$F_{осн}$, $10^{-2} \cdot \text{м}^2$	$F_{между}$ ребер, $10^{-2} \cdot \text{м}^2$	$F_{под}$ ребрами, $10^{-2} \cdot \text{м}^2$	$F_{ребер}$, $\cdot \text{м}^2$	$F_{полн}$, $\cdot \text{м}^2$								
по- лир.	0/25	-	-	-	-	307	-		2,4112	-	-	-	0,024112								
ше- рох.																					
треуг.														0/4	284			1,2998		0,1078	0,12083
трапец.														2/4	282	36	107	1,2880	1,1309	0,1178	0,130671
параб.														2/4	284			1,3037		0,1180	0,131049
прям.														2/2	277	47		1,6807	0,7383	0,1532	0,169999

Примечание: d_n – наружный диаметр ребра; $d_{ос}$ – диаметр образца по основной поверхности; h – высота ребра; s – шаг ребра; $\delta_{вер}$ – толщина ребра у вершины; $\delta_{осн}$ – толщина ребра у основания; $L_{ороб}$ – длина оребренной поверхности образца; $L_{образ}$ – длина образца; n – количество ребер; D – наружный диаметр кольцевого канала; $F_{осн}$ – площадь образца по основной поверхности; $F_{между ребер}$ – площадь межреберной поверхности образца; $F_{под ребрами}$ – площадь образца, находящаяся под ребрами; $F_{ребер}$ – площадь ребер; $F_{полн}$ – полная наружная площадь образца.

1.3. Методика проведения экспериментальных исследований

На основной поверхности образцов и на ребрах фрезеровались канавки для установки термопар, которые потом зачеканивались вкладышами из материала образца. Для измерения температурного напора использовались хромель-копелевые дифференциальные термопары с толщиной проводников 0,5 мм.

За температуру насыщения принималась температура, измеренная двумя термопарами, расположенными в паровом пространстве и жидкой фазе. Показания термопар контролировались образцовым манометром. Условия насыщения в рабочей камере поддерживались регулированием расхода охлаждающей воды через теплообменник-конденсатор. За температуру поверхности принималась средняя температура по результатам измерения шести термопар, расположенных в двух характерных сечениях, в каждом из которых устанавливалось по три термопары, измеряющих температуру основания, середины и вершины ребра.

Применялся компенсационный метод измерения термо-ЭДС. За эталон компенсационной ЭДС принималась ЭДС наводимая одной термопарой, помещенной в термостат, где поддерживалась температура 0 °С. В качестве измерительного прибора использовалось устройство аналого-цифрового преобразования ADC32-1533 класса точности 0,02, максимальная приведенная погрешность измерения которого составляет 0,1 °С. Диапазон измерения температур –50 ÷ 150 °С.

Экспериментальные исследования проводились при постепенном повышении тепловой нагрузки до достижения максимально возможной ее величины, после чего тепловой поток плавно уменьшался до минимума.

Была оценена погрешность измерений. В результате расчетов получено, что погрешность коэффициентов теплоотдачи не превысила 15 %.

Экспериментальное исследование интенсивности теплоотдачи при кипении ацетона и этанола, при абсолютном давлении $P = 0,1$ МПа, проводилось в диапазоне тепловых потоков 8 ÷ 63 кВт/м². Температура насыщения ацетона и этанола, соответственно, $t_{нас.} = 56,1$ °С и 78,3 °С.

Экспериментальные исследования проводились в условиях «стеснения». Уровень исследуемой жидкости над вершиной ребра образца составлял порядка 28 мм и был ограничен наружным диаметром кольцевого канала.

Для того чтобы удостовериться в надежности получаемых опытных данных, на созданной экспериментальной установке, были выполнены контрольные опыты [4]. Эксперименты по кипению воды и ацетона при атмосферном давлении на гладкой горизонтальной трубе проводились в диапазоне тепловых потоков 10 ÷ 100 кВт/м². Полученные опытные данные удовлетворительно согласуются с результатами опытов по кипению воды и ацетона при атмосферном давлении, полученными другими авторами [5, 6–8] на технически гладких поверхностях, что доказывает корректность выбранной методики проведения экспериментов.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Во время опытов проводились визуальные наблюдения за процессом парообразования на поверхности образцов. Зарождение паровых пузырей происходило у основания ребер. На этих участках, вследствие изменения конфигурации поверхности и местных температурных напряжений, имелись локальное ухудшение смачиваемости поверхности и наличие адсорбированных газов, служащих центрами парообразования. В местах соединения ребер с трубкой осуществлялся наибольший перегрев рабочей жидкости. Кроме того, вследствие небольшого объема жидкости, заключенного в межреберных участках, обеспечивался больший перегрев жидкости, что при-

водило к увеличению толщины перегретого слоя. При этом в работу вступали центры с большим радиусом кривизны и улучшались условия роста паровых пузырей.

Все эти явления приводили к тому, что на оребренной поверхности пузырь вырастал до размеров больших, чем на гладкой. Ограничение ребрами объемов жидкости вызывало своеобразные турбулентные пульсации при росте, отрыве и подъеме пузырей, что усиливало интенсивность теплообмена. При наступлении развитого режима кипения в верхней части кольцевого канала наблюдалась сплошная паровая прослойка, отжимавшая свободную поверхность кипящей жидкости к теплоотдающей поверхности, увеличивая этим степень турбулизации, что приводило к увеличению интенсивности теплоотдачи.

Тепловой поток, подводимый электрическим нагревателем, делился на тепловой поток через поверхность между ребрами и тепловой поток через основание ребер.

$$Q_{\text{эл.нагр.}} = Q_{\text{ребра}} + Q_{\text{меж.реб.}}, \quad (1)$$

$$\text{где } Q_{\text{ребра}} = Q_{\text{эл.нагр.}} \cdot \frac{F_{\text{ребра}}}{F_0} \text{ и } Q_{\text{меж.реб.}} = Q_{\text{эл.нагр.}} \cdot \frac{F_{\text{меж.реб.}}}{F_0}. \quad (2, 3)$$

F_0 – площадь основной (несущей) поверхности.

Плотности теплового потока по основной (несущей) поверхности и на ребре определялись следующим образом:

$$q_0 = \frac{Q_{\text{эл.нагр.}}}{F_0} \text{ и } q_p = \frac{Q_{\text{ребра}}}{F_{\text{ребра}}}. \quad (4, 5)$$

На рис. 1а приведены зависимости температурного напора по ребру ΔT_p от плотности теплового потока на основной (несущей) поверхности образца q_0 , при кипении ацетона и этанола для всех типов исследованных оребренных и гладких поверхностей.

На рис. 1б представлены зависимости коэффициентов теплоотдачи по ребру α_p^* от плотности теплового потока на основной поверхности образца q_0 для ацетона и этанола (при построении зависимостей для гладких поверхностей за температурный напор и коэффициенты теплоотдачи принимались температурный напор и коэффициенты теплоотдачи по основной поверхности образца).

Коэффициент теплоотдачи по ребру α_p^* рассчитывался следующим образом:

$$\alpha_p^* = \frac{q_0}{\Delta T_p}, \quad (6)$$

где ΔT_p – средний температурный напор по ребру.

Такое сравнение представляется более корректным, поскольку позволяет судить о влиянии развития поверхности на температурный напор и коэффициенты теплоотдачи при кипении.

Анализируя данные зависимости, можно сделать вывод о том, что при кипении на оребренной поверхности, расположение зоны наиболее интенсивного парообразования в значительной мере определяется плотностью теплового потока, условиями зарождения и отвода паровой фазы – теплоподвода к паровым пузырям во время их пребывания в межрёберном пространстве (шаг, высота и профиль ребер), теплофизическими свойствами жидкости.

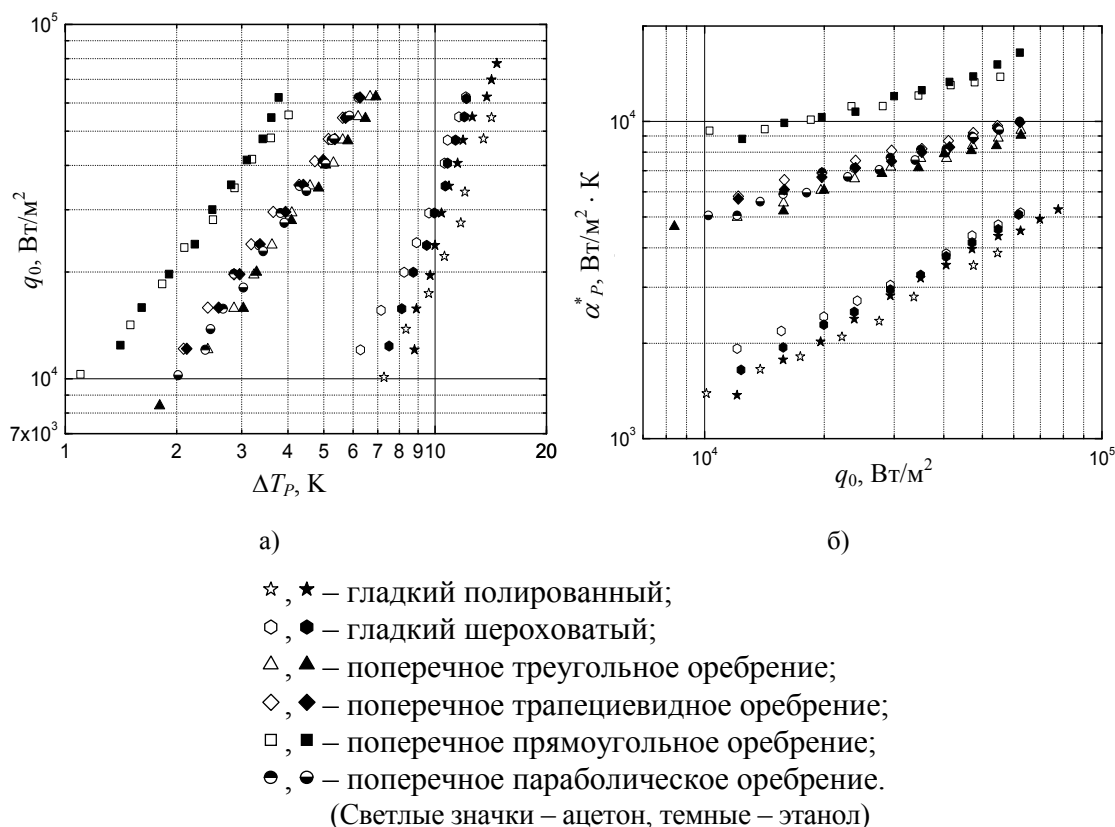


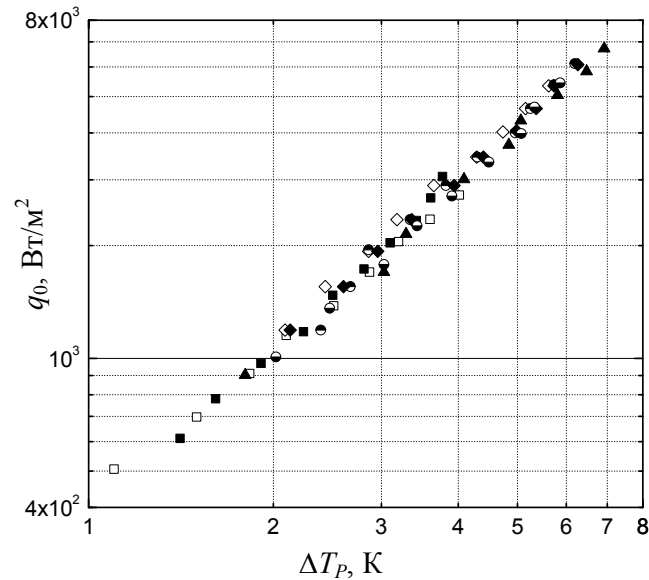
Рис. 1. Экспериментальные зависимости среднего температурного напора по ребру от плотности теплового потока на основной поверхности образца $q_0 = f(\Delta T_p)$, при кипении ацетона и этанола на поперечно оребренных и гладких поверхностях (а); зависимости коэффициентов теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока на основной поверхности образца $\alpha_p^* = f(q_0)$ для ацетона и этанола (б)

Из всех типов оребренных поверхностей наиболее низкий температурный напор по ребру начала процесса кипения наблюдался у оребрения с прямоугольным профилем ребра $\Delta T_p = 1,2$ °К. При дальнейшем увеличении плотности теплового потока эта закономерность сохранялась. Это объясняется большей наружной площадью образца с прямоугольным профилем ребра, по сравнению с другими типами ребер, что позволяет отводить такой же тепловой поток с меньшими температурными напорами.

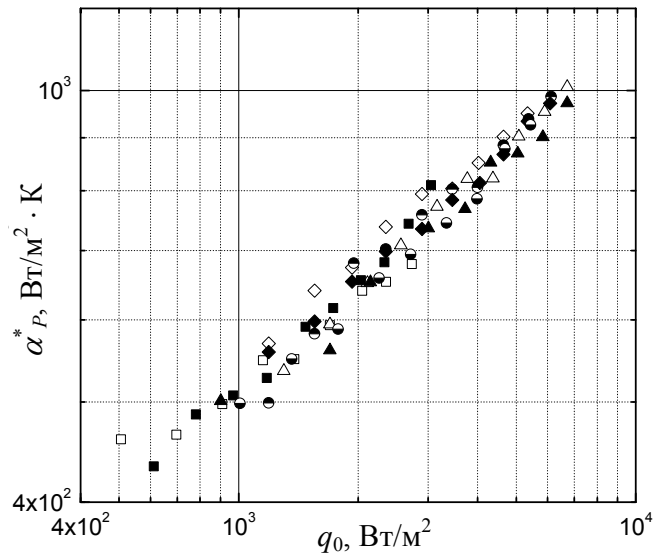
При плотностях теплового потока $q_0 < 30$ кВт/м² коэффициенты теплоотдачи по ребру α_p^* практически одинаковы для ацетона и этанола. При увеличении плотности теплового потока $q_0 > 30$ кВт/м² коэффициенты теплоотдачи для ацетона имеют меньшее значение, нежели для этанола. Это объясняется тем, что при различных отрывных диаметрах парового пузыря этих жидкостей, при одинаковых межреберных расстояниях, образование более крупных пузырей для ацетона (вследствие меньшей теплоты парообразования) приводит к ухудшению теплоотдачи в результате запаривания межреберной поверхности.

Определяющим параметром (при прочих равных условиях), характеризующим интенсивность теплообмена между данной поверхностью и средой является величина температурного напора между теплоотдающей поверхностью и жидкостью. Поэтому исследование влияния подводимого теплового потока на градиент температуры в различных точках оребренной поверхности позволяет выявить качественное и количественное влияние этого параметра на теплообмен при кипении.

На рис.2 а,б представлены зависимости среднего температурного напора и коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока, отнесенного к поверхности ребра $q_p = f(\Delta T_p)$ и $\alpha_p = f(q_p)$.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости среднего температурного напора по ребру от плотности теплового потока отнесенного к поверхности ребра $q_p = f(\Delta T_p)$ (а); зависимости коэффициента теплоотдачи по ребру от плотности теплового потока, отнесенного к поверхности ребра и $\alpha_p = f(q_p)$ (обозначения см. на рис. 1) б)

Плотность теплового потока через ребро изменялась в диапазоне $q_p = 0,5 \div 6,5$ кВт/м², коэффициент теплоотдачи по ребру в диапазоне $\alpha_p = 0,45 \div 1$ кВт/(м²·К). Анализ полученных данных показал, что при кипении аце-

тона и этанола, наиболее высокий коэффициент теплоотдачи имеет трапециевидное оребрение. Это можно объяснить тем, что данный вид оребрения имеет наибольшую площадь поперечного сечения ребра среди оребрения своего типа, и, следовательно, при одинаковой плотности теплового потока работает на более низких температурных напорах, что и приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи.

Следует отметить тот факт, что температурный напор по ребру ΔT_p практически не зависит от свойств жидкости (рис. 2а).

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что средние коэффициенты теплоотдачи по ребру (рис. 2б), слабо зависят от профиля ребра при свободном отводе паровой фазы.

3. Обобщение результатов

В данной работе рассматривалась задача определения интенсивности теплообмена при кипении. В этом случае искомой величиной являлся коэффициент теплоотдачи α , а определяемым число – число Нуссельта. В монографии Толубинского В.И. [3] для гладкой поверхности, без учета свойств последней, решение этой задачи было получено в виде:

$$Nu = CK^m Pr^n, \quad (7)$$

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

Критерий K – специфический критерий, различный для различных видов конвективного теплообмена: для свободной конвекции – это число Грасгофа или Архимеда, для вынужденного движения – число Пекле или Рейнольдса.

Для теплообмена при кипении это число можно записать в виде:

$$K = Pe \cdot Fo = \frac{q}{r \cdot \rho_{II} \cdot d_0 \cdot f} = \frac{q}{r \cdot \rho_{II} \cdot \omega''}, \quad (8)$$

где d_0 – отрывной диаметр пузыря; f – частота отрыва паровых пузырей; ω'' – скорость роста паровых пузырей, характеризующая среднюю скорость роста последних в данной точке и паропроизводительность одного центра парообразования.

На основании экспериментальных данных автором [3] была получена обобщающая зависимость, описывающая известные литературные данные по кипению неметаллических жидкостей:

$$Nu = 75 \cdot K^{0,7} Pr^{-0,2}. \quad (9)$$

При расчете теплоотдачи с оребренной поверхности необходимо определить приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{ПРИВ} = \alpha_P \cdot E \cdot \frac{F_P}{F_{MP} + F_P} + \alpha_{MP} \cdot \frac{F_{MP}}{F_{MP} + F_P}, \quad (10)$$

где F_{MP} – площадь межреберной поверхности образца; α_P, α_{MP} – средние коэффици-

енты теплоотдачи по ребру и межреберной поверхности $E = \frac{th\left(\frac{h_P}{\delta_0} \sqrt{2Bi}\right)}{\frac{h_P}{\delta_0} \sqrt{2Bi}}$ – коэф-

коэффициент эффективности ребра; $Bi = \frac{\alpha_p \cdot l_p}{\lambda_M}$ – приведенное число Био; $l_p = \frac{F_p}{P_p}$ – приведенная высота ребра; P_p – периметр ребра.

В качестве параметра, учитывающего форму и размеры ребра, предлагается использовать функцию профиля ребра, отнесенную к высоте ребра [9]:

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

Тогда формулу (7) перепишем в виде:

$$Nu \lim_{x \rightarrow \infty} = CX^b K_p^m Pr^n. \quad (12)$$

Значения C , b , m и n определяются на основании экспериментальных данных. В нашем случае: $C = 21$, $b = -0,1$, $m = 0,3$, $n = -0,2$. Тогда формула (12) имеет следующий вид:

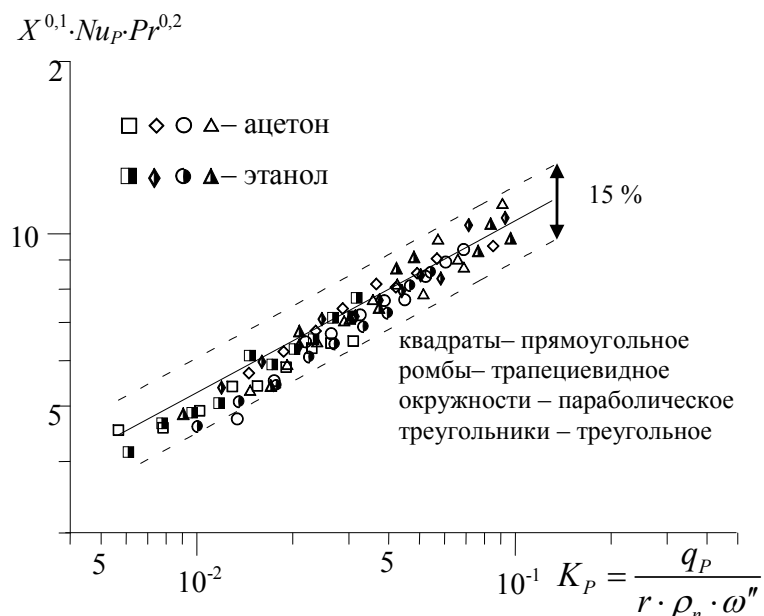
$$Nu_p = 21 \cdot X^{-0,1} K_p^{0,3} Pr^{-0,2}. \quad (13)$$

Результаты экспериментов описываются полученной зависимостью с погрешностью $\pm 15\%$.

При обобщении экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи на межреберной поверхности также было использовано уравнение (7) и получена следующая зависимость:

$$Nu_{MP} = 115 \cdot K_{MP}^{0,4} Pr^{-0,2}. \quad (14)$$

Сравнение экспериментальных результатов и рассчитанных по уравнению (13) и (14) иллюстрируется на рис. 3. Погрешность определения коэффициентов теплоотдачи также не превышает $\pm 15\%$.



а)

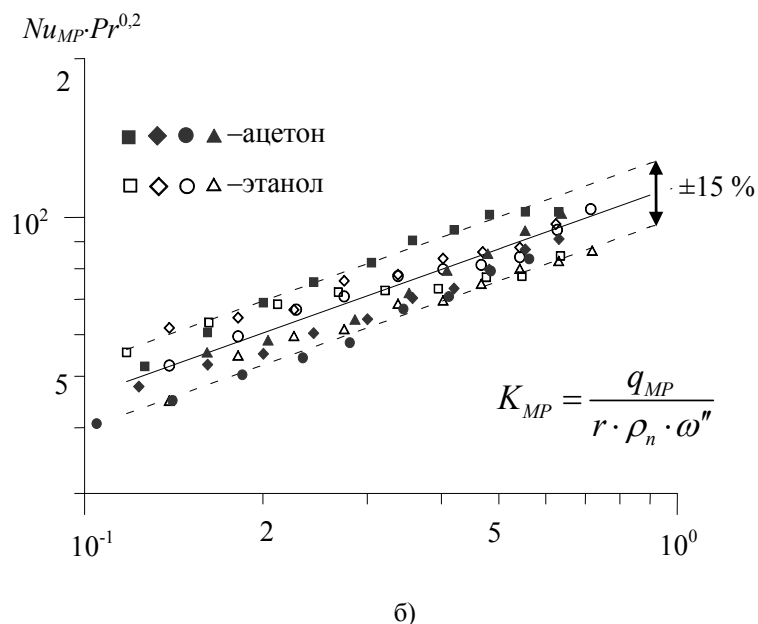


Рис. 3. Обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи на ребре (а) и межреберной поверхности (б) для оребренных поверхностей по уравнениям (13 и 14), соответственно

Выводы

Получены качественные и количественные зависимости температурного напора и коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении ацетона и этанола при атмосферном давлении.

Из всех исследованных типов оребрения, наиболее высокий коэффициент теплоотдачи по ребру имеет оребрение трапециевидного профиля.

Получены критериальные уравнения для расчета интенсивности теплоотдачи элементов оребренной поверхности при кипении ацетона и этанола при атмосферном давлении, описывающие результаты экспериментальных исследований с точностью ($\pm 15\%$).

Список литературы

1. Интенсификация теплообмена: Успехи теплопередачи /Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин, Б.В. Дзюбенко и др.; Под ред. проф. А.А. Жукаускаса и проф. Э.К. Калинина. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – 188 с.
2. Мигай В.К. Повышенные эффективности современных теплообменников. – Л.: Энергия, 1980. – 144 с.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980. – 316 с.
4. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с продольным оребрением в кольцевом канале /А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский, М.Н. Новиков, Е.А. Коршунов //Вестник ГГТУ. – 2002. – № 3-4. – С. 131-135.
5. Малышенко С.П. Особенности теплообмена при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями //Теплоэнергетика. – 1991. – № 2. – С. 38-45.
6. Boiling heat transfer from surfaces with porous layers /N.H. Afgan, L.A. Jovic, S.A. Kovalev, V.A. Lenykov //Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 1985. – Vol. 28, № 2. – P. 415-422.

7. Стюшин Н.Г., Элинзон Л.М. Исследование интенсивности теплопередачи к кипящим жидкостям при атмосферном и пониженных давлениях в условиях естественной конвекции //ИФЖ. – 1969. – Т. 41, № 1. – С. 54-58.
8. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Исследование теплообмена при кипении ацетона на мелкопористой капиллярной структуре. – Свердловск, 1987. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, № 666–В87.
9. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена /Пер. с англ. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.

Получено 09.07.2003 г.