

УДК. 536.24

**А.В. Овсянник, Д.А. Дробышевский**

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, пр. Октября, 48, г. Гомель, 246746

**ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА-134a НА ПРОДОЛЬНО ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ РЕБРА**

*Приводятся результаты экспериментов по исследованию интенсивности теплоотдачи при кипении фреона-134a на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра в условиях свободного движения в диапазоне тепловых потоков  $5 \div 60$  кВт/м<sup>2</sup>. Осуществлен сравнительный анализ влияния типа и геометрии оребренной поверхности. Получено полумпирическое критериальное уравнение, позволяющее рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении фреона-134a на продольно оребренных поверхностях в исследуемом диапазоне тепловых потоков.*

**Ключевые слова:** Кипение – Теплообмен – Ребро – Профиль – Давление – Ацетон – Этиловый спирт – Критериальное уравнение

*The experimental results on research of heat transfer intensity during boiling of freon-134a on the ribbed longitudinally sides with different rib profile are presented in this paper. The above mentioned experiment has been conducted in free movement fluid in the range of heat fluxes of  $5 \div 60$  kW/m<sup>2</sup>. The comparative analysis of the influence of a type and the geometry of the ribbed surfaces has been done. Half-empiric criterion equation, have been obtained enabling to analyze the heat transfer intensity during boiling of freon-134a on the ribbed longitudinally sides in the researched range of heat fluxes.*

**Keywords:** Boiling – Heat exchange – Rib – Profile – Pressure – Acetone – Ethyl spirit – Criterion equation

**I. ВВЕДЕНИЕ**

В связи с принятием Монреальской конвенции 1987 г., запрещающей использование озоноразрушающих хладагентов R12, R502, R22 и др., основными мировыми производителями химической продукции были разработаны и выпускаются озонобезопасные хладагенты R134a, R402a, R407c и др. Однако ни один из известных или недавно синтезированных индивидуальных хладагентов не обладает к настоящему времени в полной мере комплексом свойств, которые присущи запрещенным хладагентам, а также неблагоприятные с позиции теплообмена при кипении режимные параметры и, как отмечено выше, свойства холодильных агентов вызывают необходимость отыскания путей интенсификации процесса теплообмена при кипении [1, 2].

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.

**II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Для исследований теплообмена при кипении жидкостей в УО ГТТУ им. П.О. Сухого был создан специальный экспериментальный стенд, схема которого и методика проведения экспериментов подробно описаны в работе [3]. Экспериментальные исследования по теплоотдаче при кипении фреона-134a проводились на горизонтальных продольно-оребранных трубчатых поверхностях нагрева из дюралюминия, изготовленные фрезерованием при давлении насыщения  $p_n = 0,4 \div 0,7$  МПа и температуре  $t_n = 9,8 \div 27,5$  °С. 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. Контроль давления насыщения осуществлялся с помощью мановакуумметра МВПА-УУ2 с точностью  $\pm 0,20 \cdot 10^3$  Па. Тепловой поток, отнесенный к основной поверхности  $q = 5 \div 60$  кВт/м<sup>2</sup>, подводился к образцам электрическим нагревателем, установленным в цилиндрической полости образца.

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. Геометрические параметры экспериментальных трубок: (1 – продольное прямоугольное оребрение, 2 – продольное треугольное оребрение, 3 – продольное трапецевидное оребрение). Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

1 – Геометрические параметры исследованных образцов

$d_0$ , мм	$D_0$ , мм	$d_{вн}$ , мм	$\varphi_p$ , град	$\delta_0$ , мм	$\delta_в$ , мм	$L_0$ , мм	$N_p$ , шт	$h_p$ , мм	$F_0$ , м <sup>2</sup>	$F_H$ , м <sup>2</sup>	$D$ , мм
25	448	16	36	4	4	310	10	12	0,01310	0,05650	107
					0					0,04578	
					2					0,05102	

– диаметр образца по основной поверхности;  $D_0$  – наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр образца;  $\varphi_p$  – межреберный угол;  $\delta_0$  – толщина ребра у его основания;  $\delta_в$  – 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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

За время эксперимента накоплен значительный экспериментальный материал по кипению чистого фреона-134а в области режимных параметров соответствующих работе теплонасосных установок с различными теплоэнергетическими характеристиками. Для анализа, сопоставления и использования в расчетной конструкторской практике экспериментальные данные разными авторами представляются в той или иной форме в виде различных переменных. В работах [4–6] показано, что большинство известных критериальных соотношений, описывающих пузырьковое кипение, не позволяет обобщить опытные данные при кипении фреона-134а для разных сочетаний фреона-134а и температуры нагрева. При этом нередко наблюдается разброс опытных точек в зависимости от температуры насыщения. В связи с этим для расчета коэффициента теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении в работе [7] предложено обобщенное соотношение, которое позволяет лучше учесть свойства жидкости, исследуемой развитой формой поверхности нагрева и давления насыщения на коэффициент теплоотдачи. Для получения системных соотношений особое значение приобретают теоретические и экспериментальные исследования с целью определения внутренних характеристик механизма пузырькового кипения, а также изучения совместного влияния характеристик на гидродинамическое состояние двухфазного слоя и интенсивность отвода тепла от поверхности нагрева.

К таким характеристикам относятся отрывной диаметр и частота отрыва пузырька, скорость движения пузырьков и плотность центров парообразования на поверхности нагрева, макроскопические углы смачивания.

Анализ физических представлений о механизме переноса тепла при пузырьковом кипении соответствующих уравнений для расчета коэффициента теплоотдачи показывает, что для получения достаточно строгих количественных соотношений, способных обобщить накопленный экспериментальный материал, необходимо наиболее полным образом представить суммарный тепловой поток, отводимый с поверхности нагрева.

В настоящей статье величина температурного напора между теплоотдающей поверхностью и

жидкостью является определяющим параметром (при прочих равных условиях), характеризующим интенсивность теплообмена между данной поверхностью и средой, а тепловой поток, подводимый электрическим нагревателем, делится на тепловой поток через поверхность между ребрами и тепловой поток через основание ребер:

$$Q_{обр} = Q_{мп} + Q_p, \quad (1)$$

$$\text{где } Q_p = W \cdot \frac{F_p}{F_0} \text{ и } Q_{мп} = W \cdot \frac{F_{мп}}{F_0}, \quad (2)$$

$F_0$  – площадь основной поверхности;

$W$  – мощность подводимая к образцам электрическим нагревателем.

Плотность теплового потока  $q$  принималась в расчете на площадь несущей поверхности образца, а  $q_p$  – в расчете на площадь ребер.

Соответственно плотности теплового потока на ребре и межреберной (несущей) поверхности образца будут определяться как:

$$q_p = \frac{Q_p}{F_p} \text{ и } q = \frac{Q_{тр}}{F_{тр}}. \quad (3)$$

На рисунках 1 а, б, в, г представлены результаты экспериментальных исследований по кипению чистого фреона-134а на всех экспериментальных трубках.

Как показано на рисунках 1 а, в, во всем исследованном диапазоне давлений и плотностей теплового потока оребренная поверхность существенно интенсифицировала теплообмен.

При кипении фреона-134а на оребренной поверхности с прямоугольным профилем ребра, были получены более низкие значения градиентов температур. Это не противоречит известной тенденции снижения температурного напора с увеличением площади поверхности теплообмена.

По полученным значениям температурного напора  $\Delta T$  были определены коэффициенты теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока по элементам оребренной поверхности (рисунки 1 б, г). Из анализа полученных зависимостей (рисунок 1 г) можно сделать вывод, что средние значения коэффициента теплоотдачи по ребру, слабо зависят от профиля ребра при свободном отводе паровой фазы.

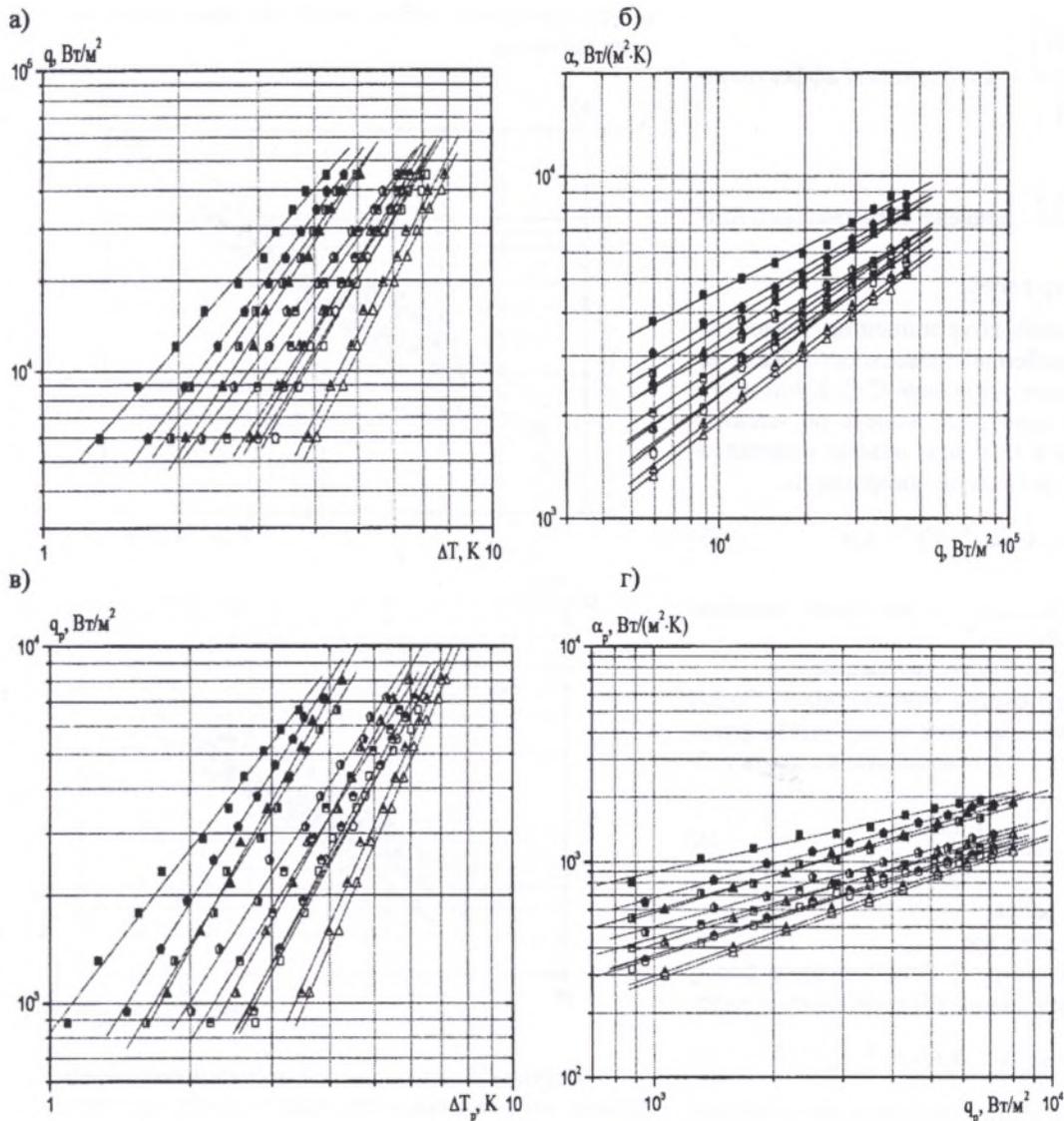


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра и давлении насыщения ( $P_n = 0,4 \div 0,7$  МПа):

- 0,4 МПа; ◻ 0,5 МПа; ◼ 0,6 МПа; ◼ 0,7 МПа - продольное прямоугольное оребрение;
- 0,4 МПа; ◐ 0,5 МПа; ◑ 0,6 МПа; ◑ 0,7 МПа - продольное трапециевидное оребрение;
- △ 0,4 МПа; ▴ 0,5 МПа; ▴ 0,6 МПа; ▴ 0,7 МПа - продольное треугольное оребрение

В данном исследовании при возрастании тепловой нагрузки и давления насыщения произошло увеличение интенсивности теплоотдачи. Повышению интенсивности теплообмена способствует активация потенциальных центров парообразования на наружных поверхностях ребер. Такое развитие процесса на оребренной поверхности теплообмена вполне логично: наилучшие условия для действия центров парообразования имеют место в межреберном пространстве (более высокие перегревы жидкости у основания ребер).

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 жид-

кой, а не паровой фазой. С увеличением вязкости теплоотдача, наоборот, уменьшается, так как уменьшается интенсивность перемешивания жидкости, обусловленная парообразованием.

#### IV. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, для расчета теплоотдачи с оребренной поверхности в инженерных расчетах используется приведенный коэффициент теплоотдачи [10]:

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

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 эффективно-

сти ребра;

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

$P_p$  – периметр ребра.

Для определения коэффициентов теплоотдачи с ребра и межреберной поверхности было использовано известное уравнение С.С. Кутателадзе [7], описывающее известные данные по теплообмену при кипении в большом объеме неметаллических жидкостей на гладкой поверхности:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n \cdot \text{Kp}^z, \quad (5)$$

где  $\text{Kp} = \frac{P_n}{\sqrt{\sigma \cdot g \cdot (\rho_x - \rho_n)}}$  – критерий подобия,

учитывающий влияние давления насыщения.

В качестве параметра учитывающего форму и размеры ребра предлагается использовать функцию профиля ребра [11], отнесенную к высоте ребра:

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

где  $f_p$  – профиль ребра;  
 $h_p$  – высота ребра, мм.

С учетом параметра  $X$ , учитывающего форму и размеры ребра, уравнение (5) переписем в виде:

$$\text{Nu} = A \cdot X^s \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n \cdot \text{Kp}^z, \quad (7)$$

где параметры  $A, s, m, n, z$  находятся на основании экспериментальных данных.

При обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении фреона-134а на межреберной поверхности было получено уравнение:

$$\text{Nu} = 3,6 \cdot \text{Re}^{0,52} \cdot \text{Pr}^{-0,37} \cdot \text{Kp}^{0,88}, \quad (8)$$

а при обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении фреона-134а на ребрах получено уравнение:

$$\text{Nu} = X^{-0,15} \cdot \text{Re}^{0,54} \cdot \text{Pr}^{-0,37} \cdot \text{Kp}^{1,22}, \quad (9)$$

Из графиков на рисунках 2 а, б видно, что формулы (8) и (9) удовлетворительно согласуются с опытными данными, значения  $\alpha$  отклоняются от расчетной зависимости не более, чем на  $\pm 25\%$ .

Таким образом, в результате сделанных работ можно говорить о том, что полученные критериальные зависимости по С.С. Кутателадзе позволяют определить интенсивность теплообмена при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра в диапазоне тепловых потоков  $q = 5 \div 60 \text{ кВт/м}^2$ , давления насыщения  $p_n = 0,4 \div 0,7 \text{ МПа}$ , ( $t_n = 9,8 \div 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

с погрешностью допустимой для теплотехнических расчетов.

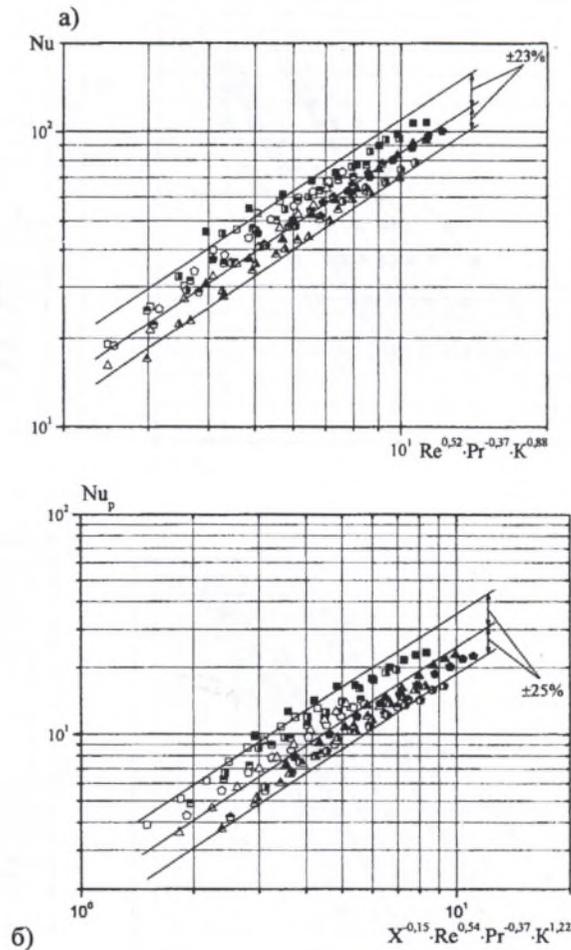


Рисунок 2 – Обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении фреона-134а:

а) на межреберной поверхности по уравнению (8),  
б) на ребре по уравнению (9)

## V. ВЫВОДЫ

Получены качественные и количественные зависимости температурного напора от подводимой мощности и плотности теплового потока при кипении фреона-134а при давлении насыщения  $p_n = 0,4 \div 0,7 \text{ МПа}$  ( $t_n = 9,8 \div 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на горизонтальных продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра.

Интенсивность теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении фреона-134а на продольно оребренной теплоотдающей поверхности практически не зависит от профиля ребра.

Получены критериальные уравнения для расчета интенсивности теплоотдачи элементов оребренной поверхности при кипении фреона-134а при давлениях насыщения  $p_n = 0,4 \div 0,7 \text{ МПа}$ , ( $t_n = 9,8 \div 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), описывающие результаты экспериментальных исследований с погрешностью  $\pm 25\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Г.Н., Тихонов А.В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении холодильных агентов на интенсифицированных поверхностях теплообмена // Кипение, кризисы кипения, закритический 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., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.
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. Данилова Г.Н. Влияние давления и температуры насыщения на теплообмен при кипении фреонов / В сб. «Теплообмен при конденсации и кипении». Труды ЦКТИ. – 1965. – Вып. 57.
5. Данилова Г.Н., Куприянова А.В. Коэффициент теплоотдачи при кипении фреонов-С318 и 21 на горизонтальной трубке // Холодильная техника. – 1967. – № 11.
6. Данилова Г.Н. Теплообмен при кипении фреонов. Докторская диссертация. – Л.: ЛТИХП, 1968.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: «Наука», 1970.
8. Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1963. – № 1.
9. Боришанский В.М., Жохов К.А. Теплообмен при пузырьковом кипении // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Том 15, № 5.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел. Теплопередача. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 416 с.
11. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. Пер. с английского. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.

---

Получена в редакции 12.09.2006, принята к печати 27.10.2006