

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА 134a НА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ОБОБЩЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

А.В. Овсянник, Д.А. Дробышевский, А.В. Шаповалов, Д.А. Гуриков

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого,
246746, Гомель, проспект Октября, 48

АННОТАЦИЯ

Проведено исследование теплообмена при кипении озонобезопасного фреона 134a на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра в диапазоне тепловых потоков 5-60 кВт/м² и давлений насыщения $p_n=0.4-0.7$ МПа (температура насыщения $t_n=9.8\div 27.5^\circ\text{C}$). Получены количественные зависимости температурно-го напора от подводимой мощности и плотности теплового потока, критериальные уравнения, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении фреона 134a на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра.

ВВЕДЕНИЕ

Для замены озонопасных хладагентов, относящихся к группам хлорфторуглеродов (R11, R12) и гидрохлорфторуглеродов (R22), с начала 90-х годов основными мировыми производителями химической продукции были разработаны и выпускаются озонобезопасные смеси группы гидрофторуглеродов (R407C и др.) и однокомпонентные озонобезопасные хладагенты (R134a и др.) [1]. R134a является хорошим заменителем запрещенного к применению фреона R12. Поэтому, в связи с широким применением R134a в холодильных и теплонасосных установках, важным становится исследование процессов теплообмена в теплообменной аппаратуре с установлением зависимостей между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и

другими факторами, влияющими на интенсивность теплоотдачи.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Экспериментальные исследования по теплоотдаче при кипении фреона 134a в условиях давления насыщения $p_n=0.4-0.7$ МПа ($t_n=9.8\div 27.5^\circ\text{C}$), проводились на экспериментальной установке [2] в условиях свободного движения рабочего тела и плотностей теплового потока $q=5-60$ кВт/м². Геометрические параметры экспериментальных трубок: (1 — продольное прямоугольное оребрение, 2 — продольное треугольное оребрение, 3 — продольное трапециевидное оребрение, 4 — гладкий образец) представлены в табл. 1

Таблица 1. Геометрические параметры исследованных образцов

№ образца	$d_{об}$, мм	D_o , мм	$d_{вн}$, мм	Фр, град.	δ_o , мм	δ_b , мм	L_o , мм	N_p , шт.	h_p , мм	F_o , м ²	F_H , м ²	D , мм
1	25	448	16	36	4	4	310	10	12	0.01310	0.05650	107
0						0.04578						
2						0.05102						
-						0.02372						
4	-	-	-	-	-	-	302	-	-	0.02372	0.02372	-

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку влияние давления на интенсивность теплообмена зависит от области рабочих давлений, корректным будет представление опытных данных в виде зависимости $\alpha=f(p_n/p_{кр})^k$. На рис. 1 приведены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от давления насыщения при кипении фреона 134a на оребренных поверхностях. Данные зависимости показывают, что α непрерывно возрастает с увеличением давления p_n . Это связано с тем, что по мере уменьшения $R_{кр}$ с ростом p_n количество работающих центров парообразования увеличивается, вследствие чего возрастает коэффициент теплоотдачи. Однако при достаточно больших плотностях теплового потока преобладающая часть потенциальных центров парообразования уже включе

на в работу по генерации паровых пузырей и дальнейшее увеличение давления не приводит к интенсификации теплообмена. На основании проведенных экспериментальных исследований был определен показатель степени k для основной поверхности (междоульцевой) $k_{осн}$ и ребра k_p (рис. 2). Из рис. 2 видно, что с повышением приведенного давления степень влияния его снижается. Это можно объяснить уменьшением перегрева, необходимого для вскипания жидкости, с возрастанием давления. Т.к. степень влияния давления связана с темпом активации центров парообразования для структур (оребрения), имеющих широкий диапазон активных центров парообразования, это влияние проявляется сильнее по сравнению с гладкой поверхностью, поскольку с изменением давления насыщения изменяется количество центров парообразования.

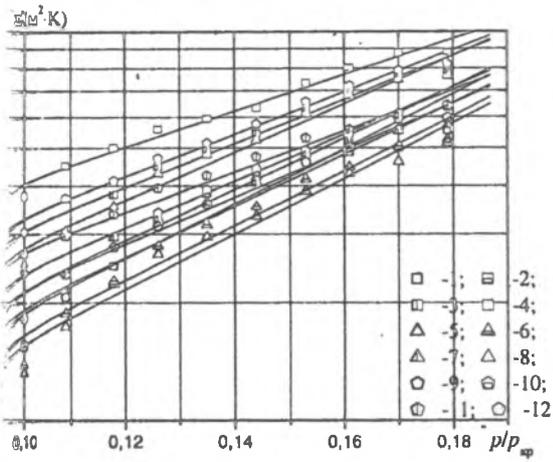


Рис. 1. Зависимость $\alpha_p = f(p_H/p_{кр})$ по основной поверхности и $\alpha_p = f(p_H/p_{кр})$ — по ребру: 1 — образец № 1, $p_H = 0.4$ МПа; 2 — образец № 1, $p_H = 0.5$ МПа; 3 — образец № 1, $p_H = 0.6$ МПа; 4 — образец № 1, $p_H = 0.7$ МПа; 5 — образец № 2, $p_H = 0.4$ МПа; 6 — образец № 2, $p_H = 0.5$ МПа; 7 — образец № 2, $p_H = 0.6$ МПа; 8 — образец № 2, $p_H = 0.7$ МПа; 9 — образец № 3, $p_H = 0.4$ МПа; 10 — образец № 3, $p_H = 0.5$ МПа; 11 — образец № 3, $p_H = 0.6$ МПа; 12 — образец № 3, $p_H = 0.7$ МПа

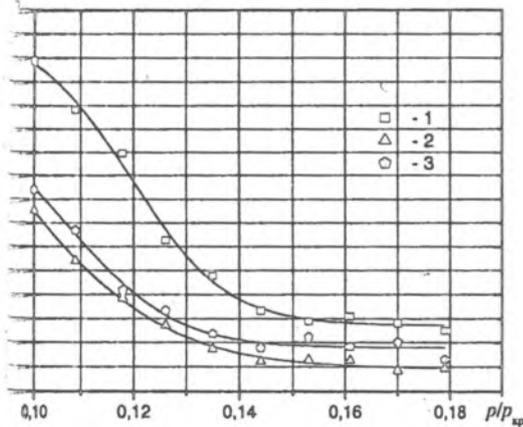
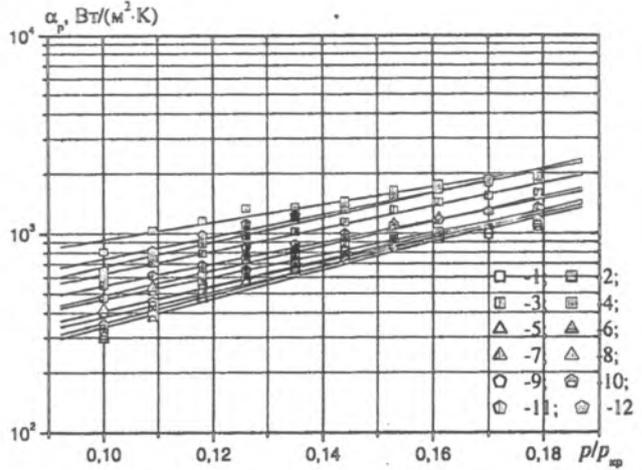
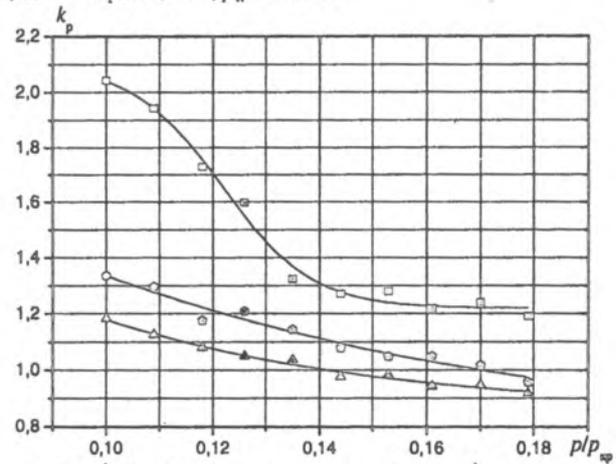


Рис. 2. Зависимость показателя степени $k_{осн}$ в соотношении $\alpha = f(p_H/p_{кр})^{k_{осн}}$ и k_p в соотношении $\alpha_p = f(p_H/p_{кр})^{k_p}$ от приведенного давления при кипении R134a: 1 — образец № 1, 2 — образец № 2, 3 — образец № 3



Как показано на рис. 3, во всем исследованном диапазоне давлений и плотностей теплового потока ребристая поверхность существенно интенсифицировала теплообмен по сравнению с гладкой. Из анализа полученных зависимостей (рис. 3г) можно сделать вывод, что средние коэффициенты теплоотдачи по ребру зависят от профиля ребра при свободном отводе второй фазы.

Немаловажное влияние на коэффициент теплоотдачи оказывает изменение отрывных диаметров d_0 паропузырей.

В работе [3] рассмотрено влияние давления на величину отрывного диаметра пузырей и другие внутренние характеристики кипения и сделан вывод, что для жидкостей d_0 изменяется приблизительно пропорционально давлению. Величина d_0 зависит также с увеличением плотности центров парообразования, что отмечалось в [4]. При повышении давления плотность центров парообразования n возрастает в связи с уменьшением $R_{кр}$. Можно предположить, что уменьшение d_0 с ростом давления приводит к снижению степени экранизации теплообменной поверхности, что способствовало улучшению условий теплообмена.

3. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K_p^z \quad (1)$$

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

$$X = \frac{f_p(x)}{h_p} \quad (2)$$

С учетом параметра X , учитывающего форму и размеры ребра, уравнение (1) перепишем в виде:

$$Nu = A \cdot X^s \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K_p^z \quad (3)$$

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

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

$$Nu = 3.6 \cdot Re^{0.52} \cdot Pr^{-0.37} \cdot K_p^{0.88} \quad (4)$$

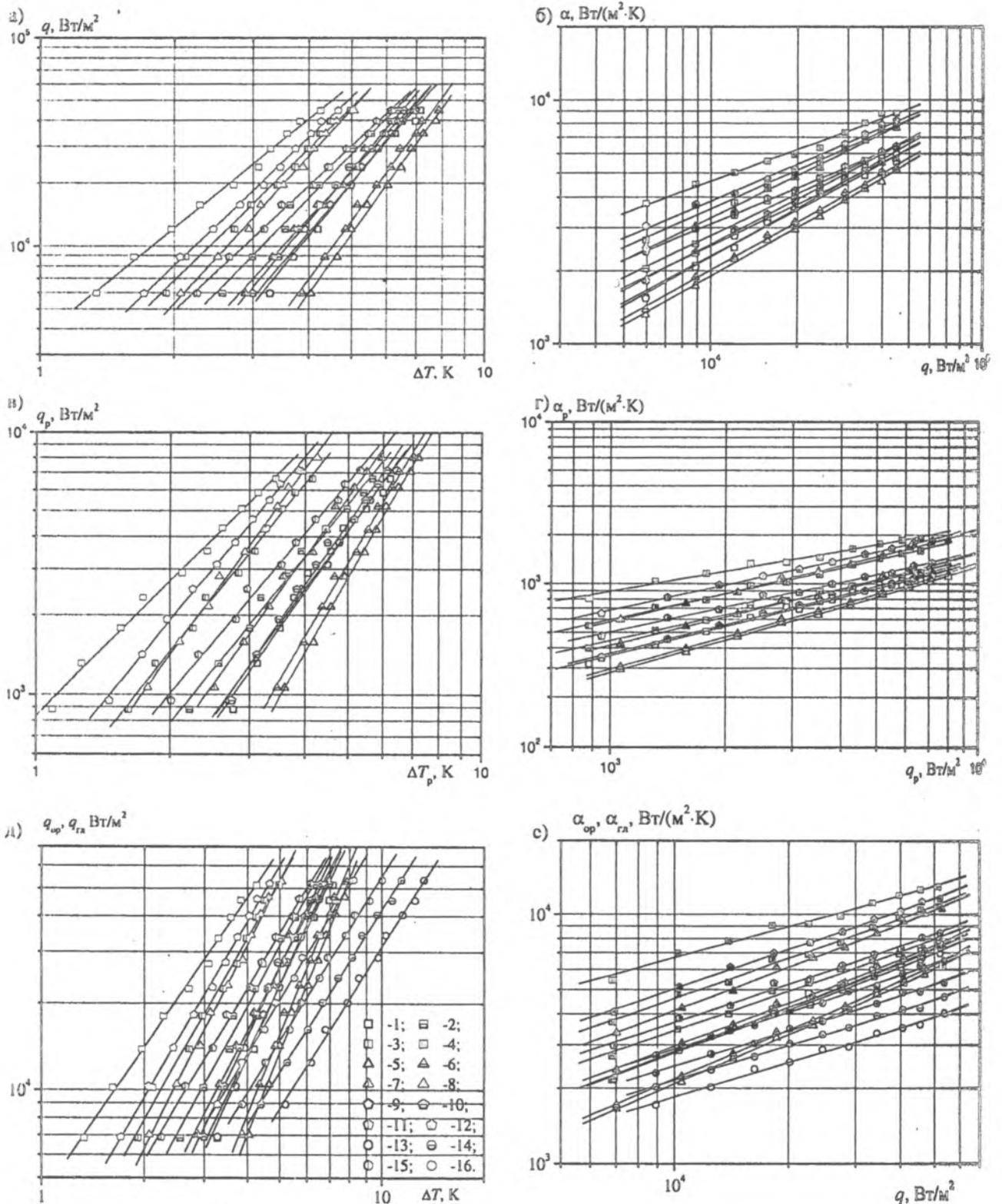


Рис. 3. Экспериментальные зависимости плотности теплового потока от температурного напора и интенсивности теплосдачи от плотности теплового потока для межреберной поверхности (а, б), ребер (в, г), оребренной и гладкой поверхности (д, е) при кипении фреона 134а: 1 – образец № 1, $p_H = 0.4$ МПа; 2 – образцы № 1, $p_H = 0.5$ МПа; 3 – образец № 1, $p_H = 0.6$ МПа; 4 – образец № 1, $p_H = 0.7$ МПа; 5 – образец № 2, $p_H = 0.4$ МПа; 6 – образец № 2, $p_H = 0.5$ МПа; 7 – образец № 2, $p_H = 0.6$ МПа; 8 – образец № 2, $p_H = 0.7$ МПа; 9 – образец № 3, $p_H = 0.4$ МПа; 10 – образец № 3, $p_H = 0.5$ МПа; 11 – образец № 3, $p_H = 0.6$ МПа; 12 – образец № 3, $p_H = 0.7$ МПа; 13 – образец № 4, $p_H = 0.4$ МПа; 14 – образец № 4, $p_H = 0.5$ МПа; 15 – образец № 4, $p_H = 0.6$ МПа; 16 – образец № 4, $p_H = 0.7$ МПа

Обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении фреона 134a на реб-
лучено уравнение

$$\alpha = 0.15 \cdot \text{Re}^{0.54} \cdot \text{Pr}^{-0.37} \cdot \text{Kn}^{1.22} \quad (5)$$

формулы (4) и (5) удовлетворительно согласуются с
данными. Значения α отклоняются от расчет-
ности не более чем на $\pm 25\%$.

ВЫВОДЫ

Коэффициент теплоотдачи непрерывно возрастает
давлением насыщения вследствие облег-
словия зарождения паровых пузырей на теплоот-
 поверхности.

При увеличении плотности теплового потока сте-
пени давления насыщения снижается из-за уве-
личения перегрева, необходимого для вскипа-
ности и снижения степени увеличения числа
центров парообразования.

Для ребер степень влияния давления проявляется
нежели для гладкой поверхности из-за больше-
ства активных центров парообразования.

Интенсивность теплоотдачи при развитом пузырь-
чении на оребренной поверхности практически
зависит от профиля ребра.

Получены зависимости плотности теплового пото-
температурного напора и интенсивности теплоот-
плотности теплового потока при кипении фрео-
на при давлении насыщения $p_n = 0.4 \div 0.7$ МПа
($t_n = 9.8 \div 27.5$ °C) на горизонтальных гладких и продольно-
ных поверхностях с различным профилем ребра.

Получены критериальные уравнения для расчета
плотности теплоотдачи элементов оребренной по-
ти при кипении фреона 134a при давлениях на-
та $p_n = 0.4 \div 0.7$ МПа ($t_n = 9.8 \div 27.5$ °C), описываю-
льтаты экспериментальных исследований с по-
тью $\pm 25\%$.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;
- p_n — давление насыщения, Па;
- t_n — температура насыщения, °C;
- D_o — диаметр образца по основной поверхности, мм;

- D_o — наружный диаметр ребра, мм;
- $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр образца, мм;
- φ_p — межреберный угол, град;
- δ_o — толщина ребра у его основания, мм;
- δ_n — толщина у вершины ребра, мм;
- L_o — длина образца, мм;
- N_p — количество ребер, шт.;
- h_p — высота ребра, мм;
- F_o — площадь образца по основной поверхности, м²;
- F_n — полная наружная площадь образца, м²;
- D — наружный диаметр образца, мм;
- α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;
- $p_{\text{кр}}$ — критическое давление, Па;
- $R_{\text{кр}}$ — критический радиус парового пузыря, мм;
- K_p — критерий подобия, учитывающий влияние давл-
ения насыщения;
- d_o — отрывной диаметр пузырей, мм;
- n — плотность центров парообразования, м⁻²;
- Nu — число Нуссельта;
- Re — число Рейнольдса;
- Pr — критерий Прандтля;
- f_p — профиль ребра.

Индексы:

- r — ребро;
- гл — гладкий образец;
- ор — оребренный образец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. М.: Колос, 2000. 160 с.
2. Кипение acetона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале /Овсянник А.В., Вальченко Н.А., Дробышевский Д.А. и др. // Вестник ГГТУ. № 2. 2002. С. 31—37.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. Киев: Наукова думка, 1980. 316 с.
4. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. М.-Л., 1952.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Наука. 1970.
6. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена: Пер. с английского. М.: Энергия. 1977. 464 с.

АВТОРЫ

Ovsiannik A.V., Drobyshevski D.A., Shapovalov A.V., Gurikov D.A.
P.O.Sukhoi State Technical University of Gomel. pr. Octiabria 48, Gomel 246746
HEAT EXCHANGE IN THE PROCESS 134a FREON BOILING ON FINNED SURFACES
WITH THE GENERALIZATION OF EXPERIMENTAL DATA

Heat exchange in the process of ozone safe freon 134a boiling on longitudinally finned surfaces with various fin profile of heat flows of 5-60 kW/m² and saturation pressures $p_n = 0.4 - 0.7$ MPa has been conducted (saturation temperature - 27.5 °C). Quantitative dependencies of temperature head upon power input and heat flow density and criterion equations obtained enabling to determine heat transfer rate in the process of freon 134a boiling on longitudinally finned surfaces with profiles.