

УДК 536.24

А.В. Овсянник, Д.А. Дробышевский

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

## ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА-134А НА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ НАСЫЩЕНИЯ

Приводятся результаты экспериментов по исследованию влияния давления насыщения на теплообмен при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра. Получены графические зависимости  $q = f(\Delta T)$ ,  $\alpha = f(q)$ ,  $\alpha = f(p_n/p_{кр})^k$ ,  $k = f(p_n/p_{кр})$  и определен показатель степени влияния давления  $k$  на теплообмен при кипении.

**Ключевые слова:** Кипение – Теплообмен – Ребро – Профиль – Давление

The results of experiments investigation the saturation pressure effect on the heat exchange during boiling of freon-134a on the sides ribbed longitudinally with different rib profile are presented here. The plots  $q = f(\Delta T)$ ,  $\alpha = f(q)$ ,  $\alpha = f(p_n/p_{кр})^k$ ,  $k = f(p_n/p_{кр})$  are obtained here, and the indicator of severity of exposure to heat exchange while boiling process by pressure influence is calculated here too.

**Keywords:** Boiling – Heat exchange – Rib – Profile – Pressure

### I. ВВЕДЕНИЕ

Величина коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкости зависит от давления, повышение которого приводит к интенсификации теплообмена, причем степень влияния давления по разному проявляется в зависимости от вида теплоотдающей поверхности и теплофизических свойств жидкости. В опубликованных по данной теме работах рассматривается влияние давления в системе на теплообменные характеристики при кипении воды, этанола, ацетона и др. жидкостей при различных тепловых нагрузках [1–3]. Сведений по кипению фреона-134а при различных значениях давлений насыщения опубликовано сравнительно немного, и они носят ограниченный характер [5–7].

Интерес к процессу теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов связан с потребностями холодильной, химической и др. отраслей промышленности. Для обеспечения режимов работы теплообменного оборудования с минимальными энергетическими затратами большее значение приобретают теоретические и экспериментальные исследования влияния на интенсивность теплообмена условий, при которых происходит процесс кипения.

Экспериментальные исследования по теплоотдаче при кипении фреона-134а в условиях различных давлений насыщения проводились на горизонтальных продольно-оребранных трубчатых поверхностях нагрева из дюралюминия [8] при давлениях насыщения  $p_n = 0,4\text{--}0,7$  МПа ( $t_n = 9,8\text{--}27,5$  °С). Эксперименты выполнялись на установке (рисунок 1), в состав которой входит кипяtilная камера из нержавеющей стали с рабочим участком и конденсатором, системы вакуумирования и заправки, измерительный комплекс, позволяющий производить компьютерную обработку информации.

Для визуальных наблюдений и фотосъемки процесса кипяtilная камера снабжена иллюминаторами.

Состояние насыщения жидкости обеспечивалось изменением производительности конденсатора.

Контроль давления насыщения осуществлялся с помощью мановакуумметра МВП3А-УУ2 с точностью  $\pm 0,20 \cdot 10^3$  Па. Тепловой поток, отнесенный к основной поверхности, ( $q = 5\text{--}60$  кВт/м<sup>2</sup>) подводился к образцам электрическим нагревателем, установленным в цилиндрической полости образца. Перепад температур между поверхностью нагрева и жидкостью измерялся дифференциальными хромель-копелевыми термопарами, один спай которых располагался в образце, а второй – в жидкости. Температурные измерения производились в установившемся режиме.

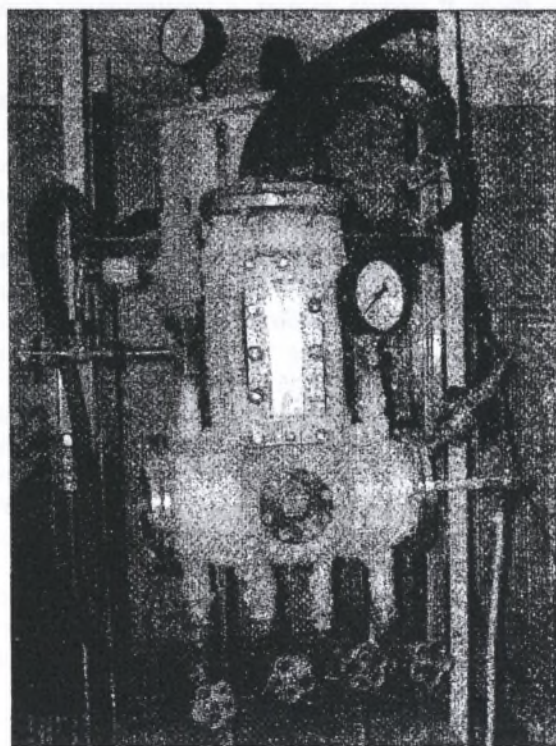


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Анализ ряда экспериментальных работ [2–4] показывает, что в зависимости от теплофизических свойств исследуемых жидкостей (фреона-11, этилового спирта, ацетона и др.) и величины тепловой нагрузки повышение давления в системе способствовало интенсификации теплообмена до некоторого его значения, после чего начиналось снижение коэффициентов теплоотдачи.

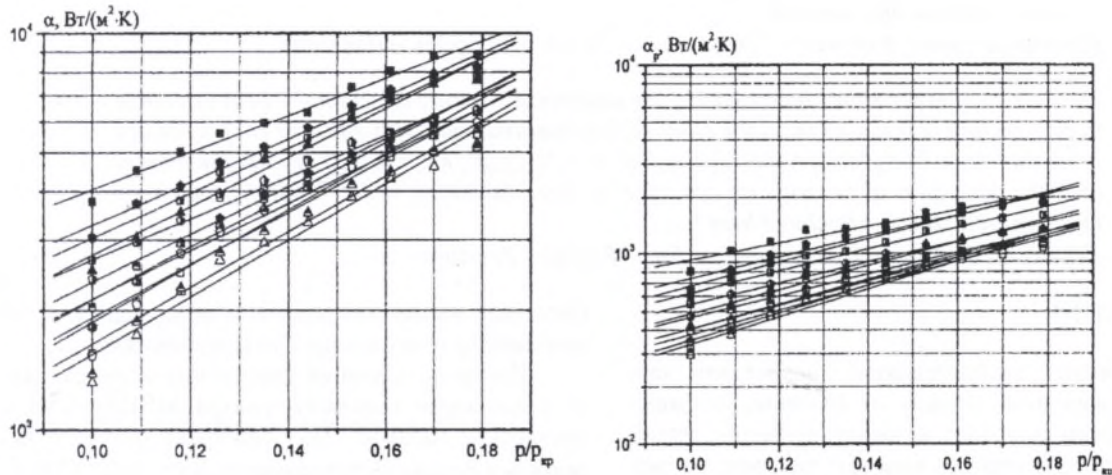


Рисунок 2 – Зависимость  $\alpha = f(p_n/p_{кр})$  по основной поверхности и  $\alpha_r = f(p_n/p_{кр})$  – по ребру

- 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 трапецевидное оребрение;
- △ 0,4 МПа; ▲ 0,5 МПа; ▲ 0,6 МПа; ▲ 0,7 МПа - продольное треугольное оребрение.

Данные зависимости показывают, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  непрерывно возрастает с увеличением давления  $p_n$ . Характер кривых  $\alpha = f(p_n/p_{кр})$  можно связать с упомянутыми выше исследованиями, т.е. с изменением соотношения характерного размера оребрения и критического радиуса пузырька  $R_{кр}$ , соответствующего началу кипения. По мере уменьшения  $R_{кр}$  с ростом давления количество работающих центров парообразования увеличивается, вследствие чего возрастает коэффициент теплоотдачи. Однако при достаточно больших плотностях теплового потока преобладающая часть потенциальных центров парообразования уже включена в работу по генерации паровых пузырей и дальнейшее увеличение давления не приводит к интенсификации теплообмена.

Более того, постепенное изменение теплофизических свойств жидкости, связанное с ростом давления, приводит к ослаблению других благоприятных для кипения факторов, и может иметь место тенденция к снижению коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

На основании проведенных экспериментальных исследований был определен показатель степени  $k$  для основной поверхности (межреберной)  $k_{осн}$  и ребра  $k_r$ .

На рисунке 3 представлены экспериментально полученные зависимости показателя степени  $k$  в соотношении  $\alpha = f(p_n/p_{кр})^k$  от приведенного дав-

ления при развитом пузырьковом кипении фреона-134а для продольно оребренных образцов с различной геометрией ребра.

Из рисунка 3 видно, что с повышением приведенного давления степень влияния его снижается. Это можно объяснить уменьшением при возрастании давления перегрева, необходимого для вскипания жидкости. Приведенные выше рассуждения позволяют обосновать ослабление степени влияния давления на интенсивность теплоотдачи с ростом теплового потока. Как отмечено выше, степень влияния давления связана с темпом активации центров парообразования (оребрение, шероховатость, пористость и т.д.). Для структур, имеющих широкий диапазон активных центров парообразования, это влияние проявляется сильнее по сравнению с гладкой поверхностью, поскольку с изменением давления насыщения изменяется количество центров парообразования.

Как показано на рисунке 4, во всем исследованном диапазоне давлений и плотностей теплового потока оребренная поверхность существенно интенсифицировала теплообмен.

Из анализа полученных зависимостей (рисунок 4 г) можно сделать вывод, что средние по ребру значения коэффициента теплоотдачи слабо зависят от профиля ребра при свободном отводе паровой фазы.



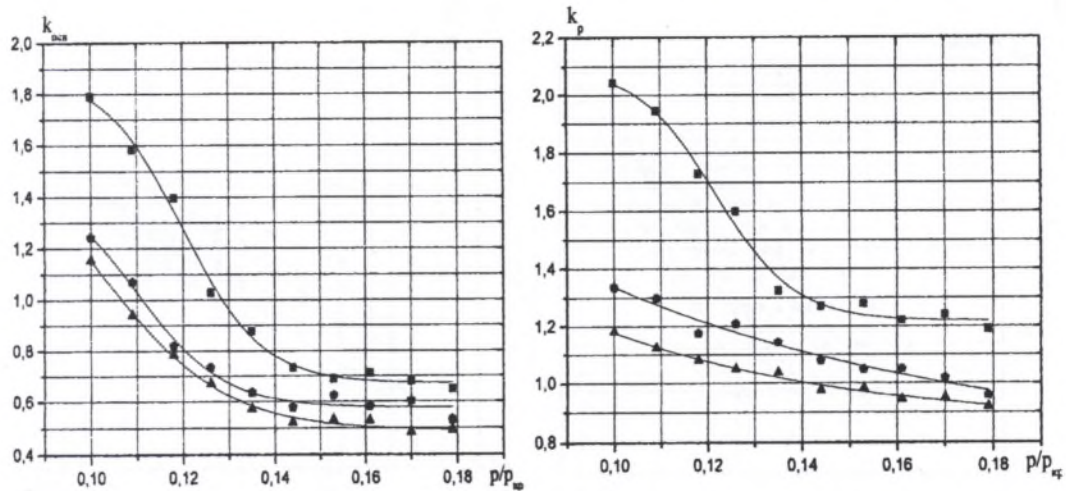


Рисунок 3 – Зависимость показателя степени  $k_{осн}$  в соотношении  $\alpha = f(p_n/p_{кр})^{k_{осн}}$  и  $k_p$  в соотношении  $\alpha_p = f(p_n/p_{кр})^{k_p}$  от приведенного давления при кипении R134a:

■ – продольное прямоугольное оребрение; ● – продольное трапецевидное оребрение;  
▲ – продольное треугольное оребрение

Как показали наши исследования, при возрастании тепловой нагрузки и давления насыщения происходит увеличение интенсивности теплоотдачи. Повышению интенсивности теплообмена способствует активация потенциальных центров парообразования на наружных поверхностях ребер. Визуальные наблюдения показали, что на поверхности образцов имело место два основных размера паровых пузырей: мелких, растущих по всей поверхности трубы, и более крупных, “вторичных”, всплывающих из межреберных каналов и нижней образующей экспериментального образца. При низких давлениях от исследуемой трубы отделялись только очень крупные, “вторичные” пузыри из каналов между ребрами, а практически вся наружная поверхность ребер была свободной от пузырей.

Такое развитие процесса на оребренной поверхности теплообмена вполне логично: наилучшие условия для действия центров парообразования имеют место на поверхности и в межреберном пространстве (более высокие перегревы жидкости у основания ребер).

С ростом давления уменьшается величина критического радиуса парового зародыша, и генерация пара начинается на ранее неактивных микровпадинах наружной поверхности ребер, которые при высоких значениях плотности теплового потока благодаря высокой теплопроводности материала исследуемых образцов оказываются достаточно перегретыми. Немаловажное влияние на коэффициент теплоотдачи оказывает изменение отрывных диаметров  $d_o$  паровых пузырей.

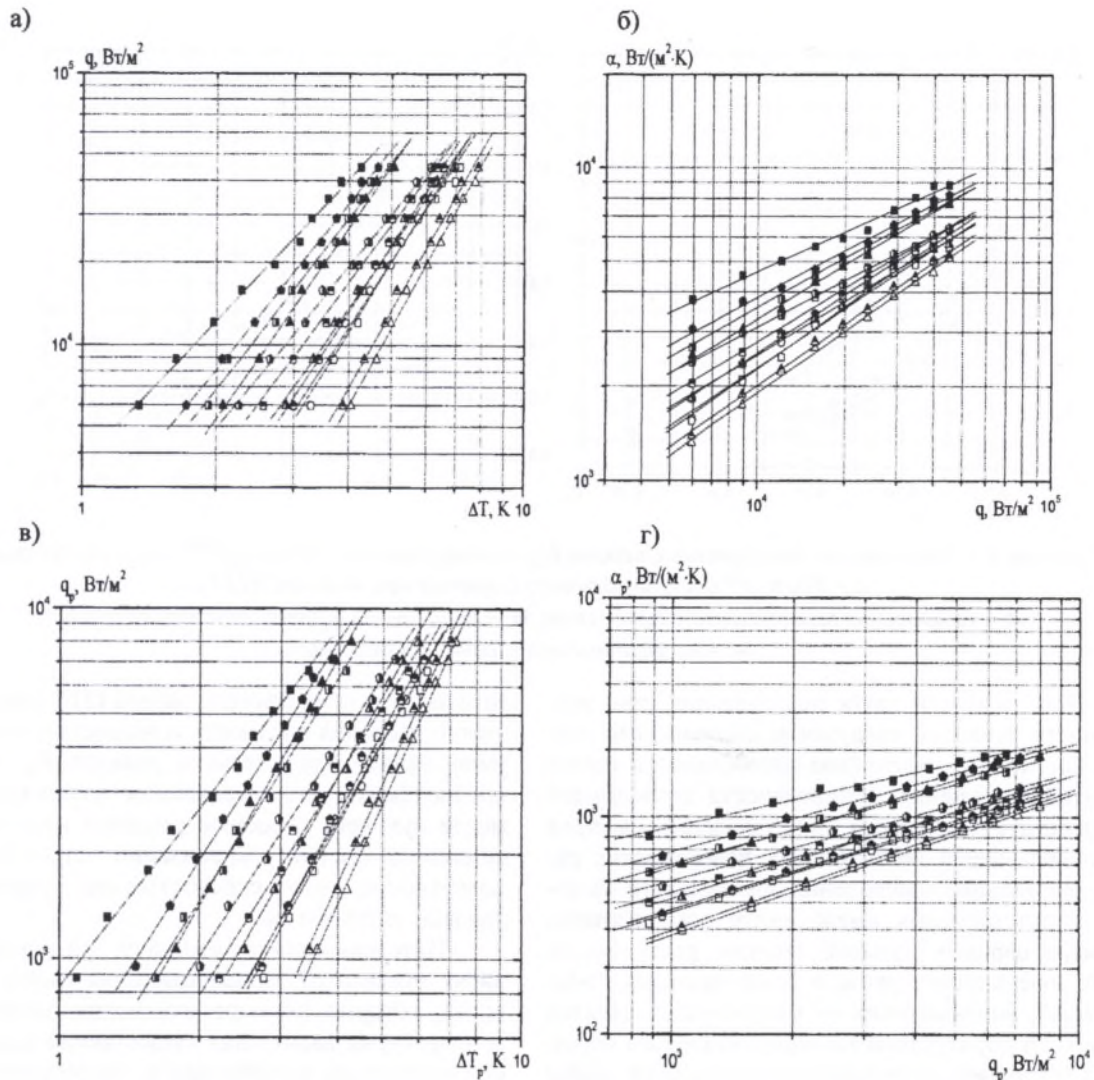
В работе [10] рассмотрено влияние давления на величину отрывного диаметра пузырей  $d_o$  и другие внутренние характеристики кипения и сделан вывод, что для ряда жидкостей указанный диаметр изменяется приблизительно обратно пропорционально давлению. Величина  $d_o$  снижается также с увеличением плотности центров парообра-

зования, что отмечалось в работе [11]. При повышении давления плотность  $n$  возрастает в связи с уменьшением критического радиуса  $R_{кр}$ . Можно предположить, что уменьшение отрывного диаметра пузырей, с ростом давления приводило к снижению степени экранизации теплообменной поверхности, что способствовало улучшению условий теплообмена.

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

### III. ВЫВОДЫ

1. Коэффициент теплоотдачи непрерывно возрастает с увеличением давления насыщения вследствие облегчения условия зарождения паровых пузырей на теплоотдающей поверхности.
2. При увеличении плотности теплового потока степень влияния давления насыщения снижается из-за увеличения величины перегрева, необходимого для вскипания жидкости и снижения степени увеличения числа активных центров парообразования.
3. Для ребер степень влияния давления проявляется сильнее, нежели для гладкой поверхности из-за большего количества активных центров парообразования.
4. Интенсивность теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении на оребренной поверхности практически не зависит от профиля ребра.



**Рисунок 4** – Экспериментальные зависимости при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра и давлении насыщения ( $R_n=0,4-0,7$  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 трапецевидное оребрение;  
 △ 0,4 МПа; ▲ 0,5 МПа; ▲ 0,6 МПа; ▲ 0,7 МПа - продольное треугольное оребрение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. // ТВТ. – 1988. – Т. 26, № 6. – С. 1233–1236.
2. Кузма-Кичта Ю.А., Москвин В.М., Сорокин Д.Н. // Теплоэнергетика. – 1982. – № 3. – С. 53–54.
3. Семена М.Г., Кравец В.Ю., Фридрихсон Ю.В., Брик Д.С. // Теплообмен-ММФ-92. Т. 4, ч. 1. – Минск, 1992. – С. 59–62.
4. Hongji Z., Aihua J. // 8th Int. Heate Pipe Conference. Preprints. Pt. A-11 – Beijing, China, 1992. – P. 1–6.
5. 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.: Изд-во МЭИ, 1994. – Т. 4. – С. 91–95.
6. Железный В.П., Жидков В.В. Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. – Донецк:Донбасс,1996. – 144 с.

7. Мааке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л. Польманн. Учебник по холодильной технике. – М.: Издательство МГУ, 1998. – 1142 с.
8. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале / А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский и др. // Вестник ГПТУ. – 2002. – № 2. – С. 31–37.
9. Овсянник А.В. Некоторые особенности кипения жидкостей в горизонтальных кольцевых каналах / Теплообмен. ММФ-2000: Труды 4-го Минского международного форума по тепло- и массообмену. – 2000. – Т. V. – С. 193–197.
10. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – К: Наукова думка, 1980. – 316 с.
11. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. – М.-Л., 1952.

Получена в редакции 19.12.2006, принята к печати 23.02.2007