

УДК 536.24

А.В. Овсянник, Д.А. Дробышевский

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА-134А НА ПРОДОЛЬНО ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

*Приводятся результаты экспериментов по исследованию интенсивности теплоотдачи при кипении фреона-134а на продольно ребренных поверхностях с различным профилем ребра в условиях свободного движения в диапазоне тепловых потоков  $5 \pm 60 \text{ кВт/м}^2$ . Получены графические зависимости:  $q = f(\Delta T)$ ,  $\alpha = f(q)$  и осуществлен сравнительный анализ влияния типа и геометрии ребренной поверхности.*

**Ключевые слова:** Кипение – Теплообмен – Ребро – Профиль – Давление – Ацетон – Этиловый спирт – Критерияльное 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  $5 \pm 60 \text{ kW/m}^2$ . The plots are obtained here:  $q = f(\Delta T)$ ,  $\alpha = f(q)$  and the comparative analysis of the influence of a type and the geometry of the ribbed surfaces has been done.*

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

### I. ВВЕДЕНИЕ

По степени озоноразрушающей активности озонового слоя Земли все хладагенты, применяемые в качестве рабочих тел в холодильных и теплонасосных установках, разделены на три группы [1]:

хладагенты с высокой озоноразрушающей активностью – это хлорфторуглероды (ХФУ или по международному обозначению CFC) R11, R12, R13, R113 и др.;

хладагенты с низкой озоноразрушающей активностью – это гидрохлорфторуглероды (ГХФУ или HCFC) R21, R22, R142b, R123, R124 и др., в молекулах которых содержится водород. Эти вещества оказывают меньшее разрушающее воздействие на озоновый слой;

хладагенты полностью озонобезопасные – это фторуглероды (ФУ или FC), гидрофторуглероды (ГФУ или HFC), углеводороды (HC) и др. К ним относятся хладагенты R134, R134a, R125, R23, R32, R290, R600 и др.

В качестве альтернативы запрещенным к производству хладагентам Монреальским протоколом рассматриваются такие классы веществ как гидрохлорфторуглероды (разрешено применение до 01.01.2030 г.), гидрофторуглероды и природные хладагенты – аммиак, диоксид углерода, углеводороды и др.

Монреальский протокол, запрещающий или ограничивающий применение озоноразрушающих хладагентов в холодильных и теплонасосных установках, установил экономические ограничения не только на производство и применения ХФУ, но и на торговлю, экспорт и импорт холодильной техники, содержащей ХФУ. Кроме того, во всех развитых странах, производящих фреоны, приняты запретительные решения по производству и при-

менению озоноразрушающих хладагентов. Так, в странах ЕС производство ХФУ прекращено 1 января 1995 г., в России – с 1 июля 2000 г. В США потребитель вынужден при покупке ХФУ заплатить государственный налог, превышающий стоимость самого хладагента [1].

Теплофизические свойства жидкостей существенно влияют на интенсивность теплоотдачи при кипении и, в связи с принятием Монреальской конвенции, запрещающей использование озоноразрушающих хладагентов, необходимо вести поиск экологически безопасных и нетоксичных рабочих тел, способных обеспечить эффективный теплообмен.

Это объясняется не только требованиями Монреальского протокола, но и стремлением снизить косвенный и прямой вклад в полный эквивалент глобального потепления холодильного оборудования – TEWI (Total Equivalent Impact). Этого можно достичь выбором хладагентов, имеющих высокую энергетическую эффективность и низкий потенциал глобального потепления. Таким требованиям в значительной степени удовлетворяют углеводороды, обладающие хорошими теплофизическими и термодинамическими свойствами и группа фреонов, имеющих нулевой озоноразрушающий потенциал и низкий потенциал глобального потепления. К таким фреонам относится в частности R134a, являющийся 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 кипе-

нии, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплоотдачи.

В условиях работы фреоновых испарителей величина термического сопротивления со стороны хладагента в большинстве случаев определяет общее термическое сопротивление и коэффициент теплопередачи аппарата. Интенсифицировать теплообмен возможно путем создания наиболее благоприятных условий парообразования у поверхности нагрева. Этого можно достигнуть созданием искусственной шероховатости или структурированием поверхности нагрева, покрытием поверхности пористыми материалами и с помощью оребрения [2–5].

Современные представления о механизме пузырькового кипения позволили судить о возможности интенсификации теплообмена при кипении на ребристых поверхностях по сравнению с гладкими и о влиянии геометрических характеристик оребрения на теплообмен. Вместе с тем полученные в работах [2–5] результаты имеют частный характер и в некоторой части противоречивы.

Принимая во внимание это обстоятельство, а также то, что в испарителях холодильных машин осуществляется процесс кипения различных хладагентов, было осуществлено исследование теплообмена при кипении чистого фреона-134а на горизонтальных гладкой технически шероховатой и трех продольно-оребранных трубках с различной геометрией ребра.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования по теплоотдаче при кипении фреона-134а в условиях давления насыщения  $P_n = 0,6$  МПа ( $t_n = 22,5$  °С), проводились на экспериментальной установке [6] в условиях свободного движения рабочего тела и плотностей теплового потока  $q = 5-60$  кВт/м<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Геометрические параметры исследованных образцов

№ образца	$d_o$ , мм	$D_o$ , мм	$d_{вн}$ , мм	$\varphi_p$ , град	$\delta_o$ , мм	$\delta_b$ , мм	$L_o$ , мм	$N_p$ , шт	$h_p$ , мм	$F_o$ , м <sup>2</sup>	$F_H$ , м <sup>2</sup>	$D$ , мм
1	25	-	16	-	-	-	302	-	-	0,02372	0,02372	107
2		448		36	4	4	310	10	12	0,01310	0,05650	
3											0,04578	
4											0,05102	

где  $d_o$  – диаметр образца по основной поверхности;  $D_o$  – наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр образца;  $\varphi_p$  – межреберный угол;  $\delta_o$  – толщина ребра у его основания;  $\delta_b$  – толщина у вершины ребра;  $L_o$  – длина образца;  $N_p$  – количество ребер;  $h_p$  – высота ребра;  $F_o$  – площадь образца по основной поверхности;  $F_H$  – полная наружная площадь образца;  $D$  – наружный диаметр кольцевого канала.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Величина температурного напора  $\Delta T$  между теплоотдающей поверхностью и жидкостью является определяющим параметром (при прочих равных условиях), характеризующим интенсивность теплообмена между данной поверхностью и средой. Плотность теплового потока  $q$  принималась в расчете на площадь несущей поверхности образца,

Для визуального наблюдения процесса кипения предусмотрены два смотровых иллюминатора диаметром 50 мм. Тепловой поток подводился к образцам электрическим нагревателем, установленным в цилиндрической полости образца. Уровень жидкости над верхней образующей экспериментальных образцов составлял ~50 мм, что обеспечивало независимость интенсивности теплообмена при кипении относительно столба жидкости над поверхностью нагрева [7]. Перепад температуры между поверхностью нагрева и жидкостью измерялся дифференциальными хромель-копелевыми термопарами с толщиной проводников 0,5 мм, один спай которых располагался в образце, а второй – в жидкости.

Сбор и обработка информации производилась автоматизированным комплексом, созданным на базе аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES, программой обработки данных ADC32GD 1.0.

Измерительная система работала в циклическом режиме опроса термодар (скорость опроса 10 измерений в секунду) через определенный промежуток времени. После достижения установленного режима теплообмена, определяемого по выводимым данным на дисплей ПЭВМ, производилась регистрация показаний термодар.

Затем изменялась величина подводимой тепловой нагрузки, и процедура повторялась до следующей экспериментальной точки. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи, определенная по методике, изложенной в работах [8, 9], не превышала 20%.

Геометрические параметры экспериментальных трубок: (1 – гладкий образец, 2 – продольное прямоугольное оребрение, 3 – продольное треугольное оребрение, 4 – продольное трапециевидное оребрение) представлены в таблице 1.

а  $q_p$  – в расчете на площадь ребер. Поэтому исследование влияния подводимой плотности теплового потока на градиент температуры в различных точках оребренной поверхности позволило выявить качественное и количественное влияние этого параметра на теплообмен при кипении.

Во время опытов велось визуальное наблюдение за процессом парообразования на поверхности исследуемых трубок. Было замечено, что на

гладкой поверхности трубки кипение начиналось и прекращалось при более высоких значениях тепловых нагрузок, чем на ребристых трубках, при этом число центров парообразования было небольшим.

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

Как показывают эксперименты, коэффициенты теплоотдачи при кипении фреона-134а на ребристой поверхности значительно выше, чем на гладкой, т.е. при пузырьковом режиме кипения теплообмен на оребренных поверхностях в 2–4

раза интенсивнее, чем на не развитой поверхности.

Особенности теплообмена при кипении на исследуемых ребристых поверхностях, обусловлены следующими обстоятельствами. У основания ребер наблюдаются наибольший перегрев жидкости и локальное ухудшение смачиваемости вследствие изменения конфигурации поверхности и местных напряжений. На этих участках поверхности адсорбируются нерастворенные газы, служащие центрами парообразования в начале процесса, и задерживаются паровые зародыши при отрыве паровой фазы от поверхности при стабилизированном кипении.

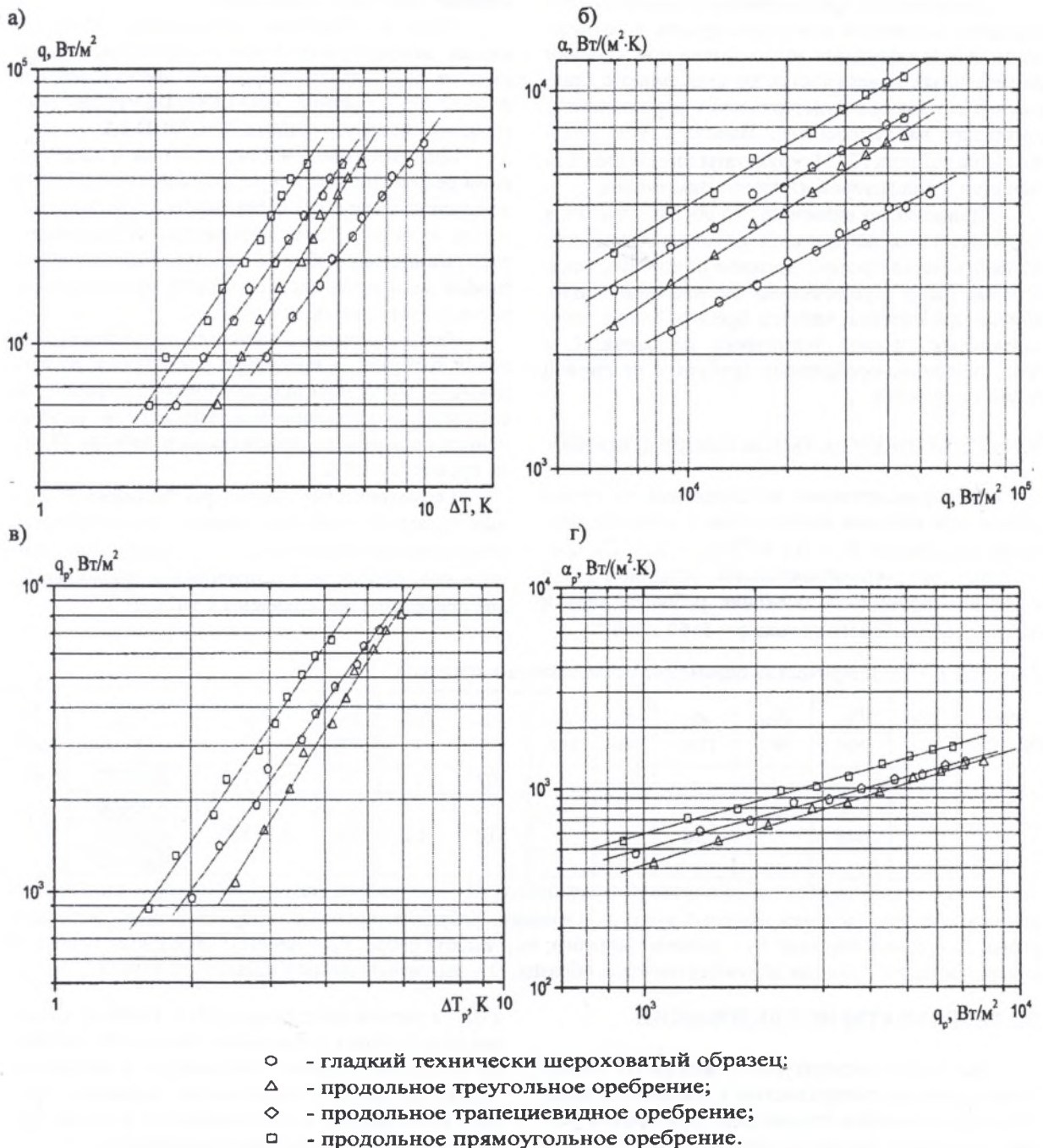


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости при кипении фреона-134а на продольно оребренных поверхностях с различным профилем ребра

Ограничение ребрами небольших объемов жидкости обеспечивает больший средний перегрев ее и улучшение условий роста пузырей. При соизмеримом соотношении между шагом ребра  $S_p$  и отрывным диаметром пузыря  $D_{отр}$  наиболее интенсивный подвод тепла осуществляется не только из микрослоя жидкости у основания пузыря, как у гладкой поверхности, но и из перегретого тонкого слоя жидкости, заключенного между пузырем и ребром. Наличие более интенсивного парообразования в малых объемах жидкости, заключенной в межреберных пространствах, вызывает усиление турбулентных возмущений пограничного слоя по сравнению с гладкими поверхностями. Отмеченные обстоятельства вызывают уменьшение величины температурного напора при одинаковых плотностях тепловых потоков и давлении насыщения для ребристых труб по сравнению с гладкими.

Влияние оребрения сказывается наиболее существенно на коэффициенте теплоотдачи в начальной стадии развитого кипения, т.е. при небольших плотностях теплового потока. При больших значениях плотности теплового потока ( $q > 50$  кВт/м<sup>2</sup>) происходит интенсивное слияние паровых пузырей и ухудшаются условия удаления паровой фазы из межреберных участков. Это вызывает своеобразное «запаривание» теплообменной поверхности и ухудшение теплообмена.

Следовательно, при кипении на ребристых поверхностях с соизмеримым соотношением между шагом ребра  $S_p$  и отрывным диаметром пузыря  $D_{отр}$ , процесс теплообмена не является автомодельным относительно геометрических характеристик оребрения (шаг, высота, толщина ребра и др.). Они являются существенными для процесса теплообмена при кипении и должны входить в условия однозначности.

Таким образом, представленные на рисунке 1 экспериментальные зависимости  $q = f(\Delta T)$  и  $\alpha = f(q)$  подтвердили высокую эффективность оребренных поверхностей. Интенсификация процесса теплообмена наблюдалась во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

#### IV. ВЫВОДЫ

Опытные данные настоящего исследования, подтверждают эффективность применения оребрения. Интенсификация процесса теплообмена наблюдалась во всем диапазоне тепловых нагрузок. Значения коэффициентов теплоотдачи в 2-4 раза превышают аналогичные величины для гладкой технически шероховатой поверхности.

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

Наличие оребрения приводит к интенсификации теплоотдачи в основном за счет развития поверхности теплообмена и улучшения условий зарождения и роста паровых пузырей.

#### ЛИТЕРАТУРА

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. 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.: Издательство МЭИ, 1994. – Т. 4. – С. 91–95.
3. Дюндин В.А., Боришанская А.В. Влияние поверхностных условий на теплообмен при кипении жидкостей. Тепло-и массоперенос, том 2. – М., 1972.
4. Чернобыльский И.И., Ратиани В.Г. Экспериментальное исследование коэффициента теплоотдачи при кипении фреона-12 в большом объеме // Холодильная техника. – 1955. – № 3.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. Пер. с английского. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.
6. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале / А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский и др. // Вестник ГГТУ. – 2002. – № 2. – С. 31–37.
7. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Островский Ю.П. Изменение числа действующих центров парообразования в зависимости от высоты слоя жидкости // ИФЖ. – 1977. – Т. 32, № 1. – С. 13–17.
8. Шнек Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
9. Теория и техника теплофизического эксперимента / Гортышев Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Идиатуллин Н.С. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

Получена в редакции 11.09.2006, принята к печати 25.12.2006