

УДК 621.565

ББК 31.392.2:[31.312.6:31.368]

*В. Г. Букин, Хо Вьет Хынг***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА  
В КОЖУХОТРУБНЫХ ИСПАРИТЕЛЯХ  
СУДОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК***V. G. Bukin, Ho Viet Hung***IMPROVING HEAT TRANSFER EFFICIENCY  
OF SHELL AND TUBE EVAPORATORS  
OF MARINE REFRIGERATING INSTALLATIONS**

Излагаются результаты исследования по кипению хладагента R410A в кожухотрубных испарителях судовых холодильных установок. Изучено влияния конфигурации поверхности и концентрации масла на коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении на различных поверхностях. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что использование труб с развитой геометрией поверхности обеспечивает повышение коэффициента теплоотдачи. В судовых кожухотрубных испарителях затопленного типа теплообменные трубы со стандартным оребрением целесообразно заменять на трубы с развитыми поверхностями.

**Ключевые слова:** судовые холодильные установки, теплоотдача, кипение, хладагент, испаритель.

The results of investigations to determine the heat transfer of refrigerant R410A in shell and tube evaporators of marine refrigerating installations are presented. The effect of surface configuration and oil concentration on the nucleate boiling on heat transfer coefficients of different surfaces is investigated. The results of the study allow making a conclusion that the use of tubes with the developed surface geometry provides increase in heat transfer coefficient. It is advisable to replace the standard fins tubes of marine flooded shell and tube evaporator with tubes with enhanced surfaces.

**Key words:** marine refrigerating installations, heat transfer, boiling, refrigerant, evaporator.

**Введение**

Чиллеры предназначены для охлаждения воды и других холодоносителей, которые используются в системах кондиционирования и холодоснабжения. Чиллеры устанавливаются на судах с большой протяженностью трубопроводов между чиллером и воздухоохладителем, особенно если на борту несколько воздухоохладителей, что характерно для пассажирских судов. На современных судах устанавливают чиллеры известных фирм, например серия RSW тип VKN (Teknotherm) [1] – это чиллеры водяного охлаждения с диапазоном мощности от 100 до 1 500 кВт, серия PFS «В» 103.1-296.2 (McQuay-Daikin) – чиллеры с водяным конденсатором и винтовыми компрессорами, холодопроизводительность – 370–1 050 кВт [2].

В чиллерах, используемых на судах, широкое распространение получили кожухотрубные испарители [3], в которых рассол охлаждается при движении внутри трубок, а хладагент кипит в межтрубном пространстве. Достоинствами горизонтальных кожухотрубных испарителей являются простота изготовления и компактность конструкции, эффективность теплопередачи, возможность применения в закрытых рассольных системах охлаждения.

В судовых системах кондиционирования воздуха основная доля массы (35–45 %) приходится на кожухотрубные испарители. Интенсивность теплообмена в кожухотрубных испарителях со стороны хладагента существенно ниже, чем со стороны холодоносителя, поэтому наилучший способ снижения их массы и габаритных размеров – интенсификация процесса кипения хладагента на наружной поверхности труб.

Интенсифицировать процесс кипения можно различными путями: развитием структуры наружной поверхности, увеличением ее шероховатости, покрытием теплопередающих трубок неметаллическими и несмачивающимися веществами, применением пористых металлических покрытий, мелкоячеистыми сетками. Возможна также комбинация этих способов.

Перспективным направлением в интенсификации процесса кипения на наружной поверхности труб является применение теплопередающих труб с частично замкнутым объемом (ЧЗО) [4]. Трубы с ЧЗО, запатентованные нами [5–6], получают различными способами. Трубы Г-профиля выполнены путем пропускания исходной трубы со спирально-накатными ребрами через протяжку, диаметр которой меньше диаметра исходной трубы. Трубы Y-профиля выполнены путем прокатки режущим диском по середине верхней кромки ребра прямоугольного профиля.

Способ интенсификации кипения с применением труб с ЧЗО сочетает, в определенной степени, увеличение теплообменной поверхности, достигаемое на ребристых трубках, с благоприятными условиями зарождения и роста паровых пузырей, что свойственно поверхностям с ЧЗО. Основными преимуществами этого способа являются простота изготовления, низкая стоимость.

### Эксперименты

Нами экспериментально исследовался теплообмен при пузырьковом кипении хладагента R410A с разными концентрациями масла на стандартно оребренной трубе и трубах с развитой поверхностью (табл.).

Характеристики труб

Труба	Диаметр наружный, мм	Диаметр внутренний, мм	Высота ребра, мм	Шаг между осями ребер, мм	Величина щелевого зазора	Поверхность наружная, м <sup>2</sup>	Поверхность внутренняя, м <sup>2</sup>	Коэффициент оребрения
Оребренная	21,0	13,2	2,25	2,0	–	0,0437	0,012	3,64
Г-профиля	20,5	13,2	2,0	–	0,25	0,0458	0,012	3,82
Y-профиля	21,0	13,2	2,25	–	0,25	0,0504	0,012	4,2

Для изучения интенсификации кипения на трубах с ЧЗО были проведены эксперименты на стенде и по методике, описанной в [7].

Эксперименты позволяют определить плотность теплового потока  $q = N/F$ , Вт/м<sup>2</sup>, где  $N$  – электрическая мощность, снятая с нагревателя, Вт;  $F$  – площадь теплообменной поверхности экспериментальной трубы, м<sup>2</sup>; коэффициент теплоотдачи  $\alpha = q/(t_{ст} - t_n)$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), где  $t_{ст}$  – средняя температура наружной поверхности стенки;  $t_n$  – температура насыщения исследуемого вещества, К;  $\alpha$  и  $q$  отнесены к внутренней поверхности труб.

В опытах температура насыщения смеси устанавливалась от –20 до +5 °С,  $p_n = 400–931$  кПа, плотность теплового потока  $q$  изменялась от 1 до 20 кВт/м<sup>2</sup>. Использован хладагент R410A с концентрацией масла  $\xi_m = 0, 2, 5$  и 10 %. Рабочую весовую концентрацию масла определяли как  $\xi_m = G_m \cdot 100 / (G_m + G_x)$ , %, где  $G_m$  и  $G_x$  – соответственно заправочный вес масла и хладагента. В качестве смазочного материала применили синтетическое масло POE Bitzer BSE32.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1–4.

В опытах с чистым хладагентом R410A ( $\xi_m = 0$  %) установлено, что с ростом  $q$  значения  $\alpha$  повышаются (рис. 1). Это объясняется тем, что с увеличением тепловой нагрузки увеличивается число действующих центров парообразования, и, следовательно, улучшается процесс теплоотдачи от стенки к жидкости. Из рис. 1 видно, что коэффициент теплоотдачи при кипении на стандартной оребренной трубе ниже, чем при кипении чистого хладагента на трубе с ЧЗО, т. к. трубы с развитой поверхностью обеспечивают повышенную производительность за счет более высокой плотности активных центров зарождения и, возможно, более интенсивного движения жидкости в каналах. Как показали визуальные наблюдения, начало процесса кипения на трубах с ЧЗО происходит при меньших температурных напорах в сравнении с оребренной трубой.

На рис. 2 представлена зависимость  $\alpha_{ЧЗО} / \alpha_{оробр.} = f(q)$  при кипении на трубах ( $t_0 = -20$  °С,  $\xi_m = 2$  %) для всех видов труб. Экспериментально установлено, что при добавлении масла  $\xi_m = 2$  % интенсивность кипения на трубе с ЧЗО почти в 1,1...1,3 раза больше, чем на стандартно оребренной трубе. Это связано с тем, что ЧЗО обеспечивает снарядный режим движения двухфазного потока хладагента, позволяя подводить теплоту к ограниченному объему жидкости с большей поверхностью. Все это интенсифицирует процесс кипения.

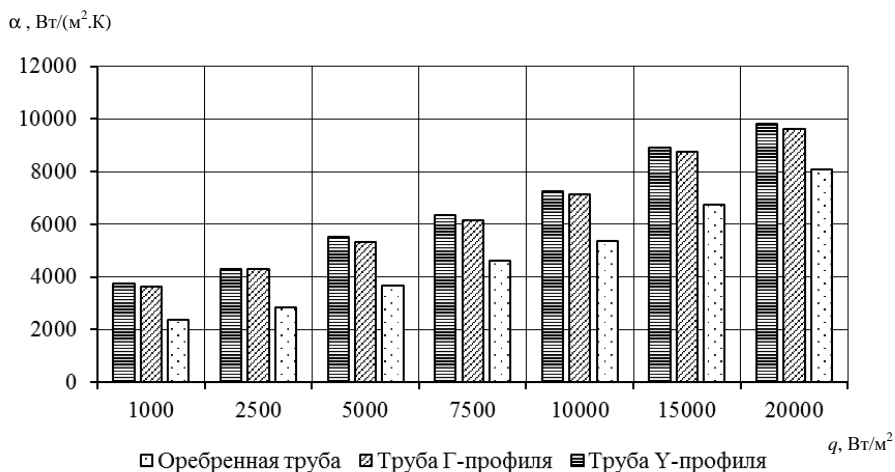


Рис. 1. График  $\alpha = f(q)$  при кипении на трубах,  $t_0 = -5^\circ\text{C}$ ,  $\xi_M = 0\%$

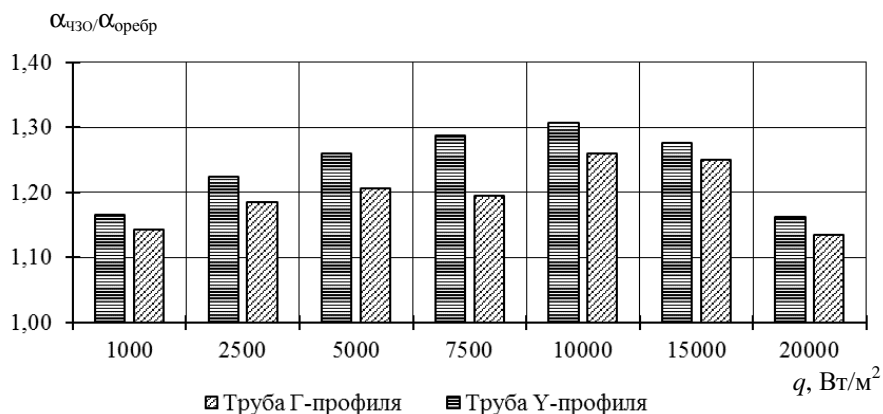


Рис. 2. График  $\alpha_{chzo}/\alpha_{orebr} = f(q)$  при кипении на трубах,  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ ,  $\xi_M = 2\%$

Из рис. 2 следует, что при  $\xi_M = 2\%$  интенсивность теплообмена у труб с Y-профилем выше, чем у труб с Г-профилем. Это связано с тем, что на трубах с Y-профилем процесс возникновения, роста и отрыва пузырей интенсивнее и коэффициент оребрения выше, чем у трубы с Г-профилем.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи, отнесенной к внутренней поверхности труб, от плотности теплового потока,  $\xi_M = 5\%$  для всех видов труб.

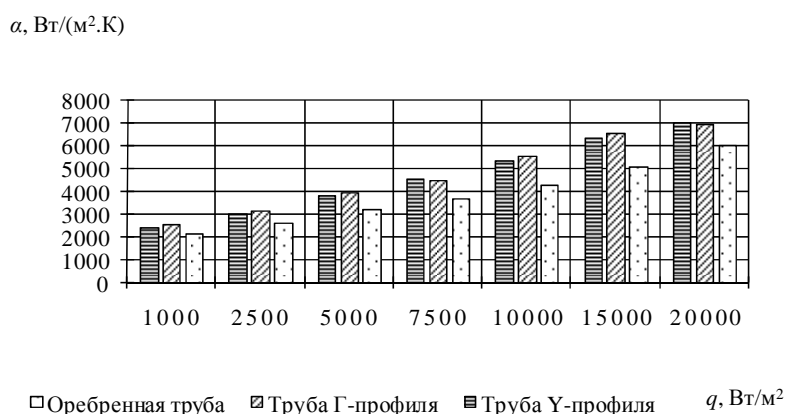


Рис. 3. График  $\alpha = f(q)$  при кипении на трубах,  $t_0 = -20^\circ\text{C}$ ,  $\xi_M = 5\%$

Данные по влиянию концентрации масла на коэффициент теплоотдачи при кипении хладагента R410A для трубы Y-профиля показаны на рис. 4.

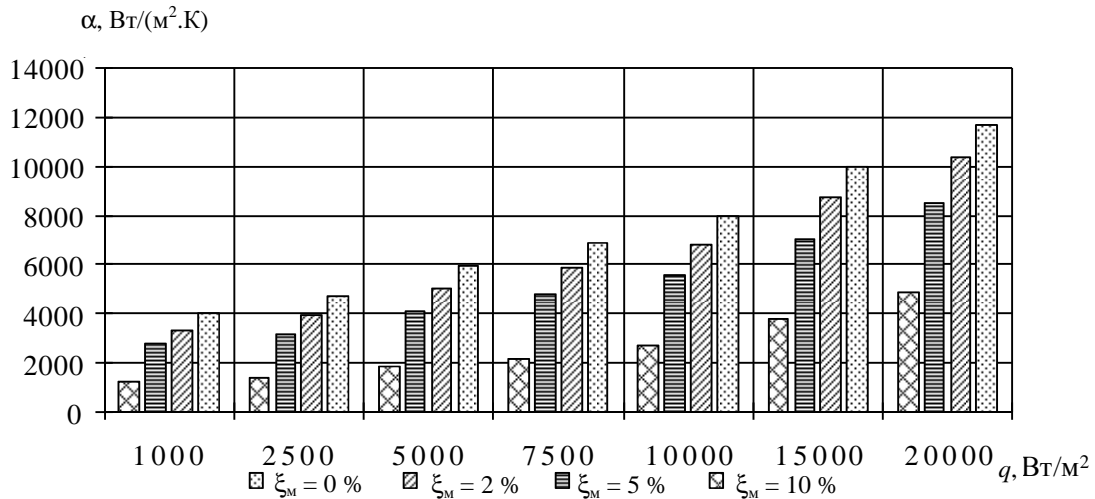


Рис. 4. Влияние концентрации масла  $\xi_m$  на коэффициент теплоотдачи при кипении хладагента R410A для Y-образной формы ребра при различных значениях плотности теплового потока,  $t_{\text{н}} = +5\text{ }^\circ\text{C}$

Из рис. 4 очевидно, что с увеличением концентрации масла производительность трубы Y-профиля падает, особенно значительно – при концентрации масла равной 10 %. Результаты эксперимента показывают, что влияние концентрации масла на коэффициент теплоотдачи слабее для интегрально оребренных труб. Высокая концентрация масла является главным фактором деградации коэффициента теплоотдачи при кипении на трубах с развитой поверхностью. Возможно, это связано с тем, что в трубах с ЧЗО затруднено удаление масла из объема вследствие малой величины зазора между ребрами, что ухудшает процесс теплообмена.

### Заключение

Таким образом, использование труб с развитой геометрией поверхности обеспечивает повышение коэффициента теплоотдачи. В судовых кожухотрубных испарителях затопленного типа теплообменные трубы со стандартным оребрением целесообразно заменять на трубы с развитыми поверхностями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Teknotherm refrigeration. Product catalogue 9.2010.
2. McQuay-Daikin. Каталог промышленного оборудования 2012.
3. Колiev И. Д. Судовые холодильные установки. – Одесса: Фенікс, 2009. – С. 73–74.
4. Букин В. Г., Саид Ахмед эль Саид, Ахмед эль Рефай Мохаммед Эмам. Результаты экспериментального исследования интенсификации теплообмена при кипении на трубах смесового хладагента // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2 (43). – С. 179–184.
5. Пат. РФ № 89680. Испаритель / Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Васильев В. Н., Бирюлин И. В.; опубл. 10.12.2009.
6. Пат. РФ № 123910. Теплообменная труба / Букин В. Г., Букин А. В., Хо Вьет Хынг; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
7. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Васильев В. Н. Экспериментальное исследование интенсификации теплоотдачи при кипении многокомпонентного хладагента R407C // Изв. Калининград. гос. техн. ун-та. – 2004. – № 6. – С. 177–185.

### REFERENCES

1. Teknotherm refrigeration. Product catalogue 9.2010.
2. McQuay-Daikin. Katalog promyshlennogo oborudovaniia 2012 [Catalogue of operational equipment].
3. Koliev I. D. Sudovye kholodil'nye ustanovki [Marine refrigerating installations]. Odessa, Feniks, 2009, pp. 73–74.
4. Bukin V. G., Said Akhmed el' Said, Akhmed el' Refai Mokhammed Emam. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniia intensifikatsii teploobmena pri kipenii na trubakh smesovogo khladagenta [Results of experimental research of intensification of heat transfer at boiling on pipes with combined refrigerant]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, no. 2 (43), pp. 179–184.

5. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Vasil'ev V. N., Biriulin I. V. *Isparitel'* [Evaporator]. Patent RF, no. 89680, 2009.
6. Bukin V. G., Bukin A. V., Kho V'et Khyng. *Teploobmennaiа truba* [Heat transfer pipe]. Patent RF, no. 123910, 2013.
7. Bukin V. G., Kuzmin A. Iu., Vasil'ev V. N. Eksperimental'noe issledovanie intensivatsii teplootdachi pri kipenii mnogokomponentnogo khladagenta R407C. [Experimental research of intensification of heat transfer at boiling of multicomponent refrigerant R407C]. *Izvestiia Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 6, pp. 177–185.

Статья поступила в редакцию 25.01.2013

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Букин Владимир Григорьевич** – Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Холодильные машины»; bukinvg@mail.ru.

**Bukin Vladimir Grigorievich** – Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department "Refrigeration Machine"; bukinvg@mail.ru.

**Хо Вьет Хынг** – Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Холодильные машины»; Hoviethung81@yahoo.com.

**Ho Viet Hung** – Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Refrigeration Machine"; Hoviethung81@yahoo.com.