

УДК 621.565
ББК 31.392.2:[31.312.6:31.368]

В. Г. Букин, Хо Вьет Хынг

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R410A И ЕГО СМЕСИ С МАСЛОМ
НА ТРУБАХ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
В ИСПАРИТЕЛЯХ СУДОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН**

V. G. Bukin, Ho Viet Hung

**ENHANCEMENT OF HEAT TRANSFER
DURING BOILING OF REFRIGERANT R410A AND ITS MIXTURE
WITH OIL ON TUBES WITH ENHANCED SURFACE
OF EVAPORATORS OF MARINE REFRIGERATING MACHINES**

Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при пузырьковом кипении хладагента R410A с разными концентрациями масла на стандартно оребренной трубе и трубах с развитой поверхностью. Использован хладагент R410A с концентрациями масла 0; 2; 5 и 10 %. В качестве смазочного материала применялось синтетическое масло POE Bitzer BSE32. Эксперименты проводились при температуре насыщения -20 , -5 и $+5$ °C. Было исследовано влияние геометрических параметров теплообменной поверхности и концентрации масла на коэффициент теплоотдачи при кипении на разных поверхностях.

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

The results of the investigation of the heat transfer at nucleate boiling of refrigerant R410A with different oil fractions on the standard finned tube and enhanced tubes are given. The refrigerant R410A with oil mass fractions 0; 2; 5, and 10 %, respectively was used. The synthetic oil POE Bitzer BSE32 was used as a lubricant. Experiments were conducted at saturation temperatures of -20 , -5 and $+5$ °C. The effect of geometric parameters and oil concentration on the heat transfer coefficient at boiling on different surfaces was investigated.

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

Введение

Обеспечение экономного и рационального расходования топливно-энергетических ресурсов – одна из важных задач энергетики России и Вьетнама. Как известно, судовые холодильные установки и системы кондиционирования воздуха на судах являются одними из наиболее энергоемких объектов. Для уменьшения расхода топлива и энергетических затрат в этих системах необходимо внедрение новых рабочих веществ и более эффективной теплообменной аппаратуры.

Кожухотрубные испарители затопленного типа, в которых рассол охлаждается внутри трубок, а хладагент кипит в межтрубном пространстве, широко применяются в средних и крупных судовых холодильных установках производительностью более 350 кВт благодаря высокой энергетической эффективности. Данные аппараты имеют большие габариты и массу. Увеличение компактности, снижение массы, стоимости и уменьшение энергозатрат этих аппаратов являются важными задачами. Решить их возможно путем интенсификации теплообмена.

Перспективным направлением в интенсификации теплообмена при кипении на наружной поверхности труб является применение труб с развитой поверхностью теплообмена. Высокая теплоотдача может быть получена при использовании труб с частично замкнутым объемом (ЧЗО). Трубы с развитой поверхностью теплообмена, а именно трубы с ЧЗО, инициируют кипение при меньших перепадах температуры и поддерживают его при низкой плотности теплового потока. Вследствие этого кипение на трубе с ЧЗО характеризуется большими значениями коэффициента теплоотдачи, чем на гладких и оребренных трубах.

Метод интенсификации теплообмена с помощью труб с развитой поверхностью теплообмена известен достаточно давно, однако исследований по влиянию таких факторов, как форма ребер, концентрация масла при кипении смесевых хладагентов на трубах с ЧЗО к настоящему времени недостаточно. Именно поэтому требуется дальнейшее изучение влияния этих параметров на теплообмен при кипении новых хладагентов, например R410A на трубах с ЧЗО.

Следует также отметить, что в настоящее время, в связи с экологическими требованиями, во Вьетнаме и России особенно актуальны вопросы о замене озоноразрушающих хладагентов на судах. Согласно новым правилам классификации и постройки морских судов Вьетнама и других стран разрешено использовать следующие хладагенты: R22, R134A, R404A, R407C, R410A, R507. Публикаций по определению коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов R22, R134A и R507 в большом объеме довольно много. Хладагент R407C нецелесообразно применять в качестве хладагента для ретрофита R22 в затопленных испарителях. Хладагент R404A используется в основном в низкотемпературном оборудовании при температуре кипения от -50 до -20 °С. Хладагент R410A – азеотропная смесь из 50 % дифторметана R32 и 50 % пентафторэтана R125. R410A имеет нулевой потенциал истощения озонового слоя Земли, является нетоксичным и непожароопасным. R410A рекомендуется применять в новых холодильных установках в качестве альтернативы R22.

В настоящее время практически отсутствуют работы, дающие обобщенную формулу для определения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R410A и его смеси с маслом на трубах с ЧЗО. Это затрудняет возможность рационального проектирования кожухотрубных испарителей затопленного типа с применением труб с ЧЗО, работающих на перспективном хладагенте R410A.

На основании вышеизложенного была определена необходимость проведения исследований по кипению хладагента R410A и его смеси с маслом на трубах с ЧЗО в испарителях судовых холодильных машин.

Методы исследования

Для изучения интенсификации кипения на трубах с ЧЗО были проведены эксперименты на стенде и по методике, описанной ранее [1, 2].

В данном эксперименте изучался процесс пузырькового кипения на оребренной трубе и двух трубах с развитой поверхностью, где ребра образуют ЧЗО. Использован хладагент R410A и синтетическое масло POE Bitzer BSE32 с концентрацией ξ_m 0; 2; 5 и 10 %. Эксперименты проводились при температуре насыщения -20 , -5 и $+5$ °С, соответственно давление насыщения $p_n = 400$, 677 и 931 кПа, плотность теплового потока q изменялась от 1 до 20 кВт/м².

Эскизы ребер с ЧЗО представлены на рис 1.

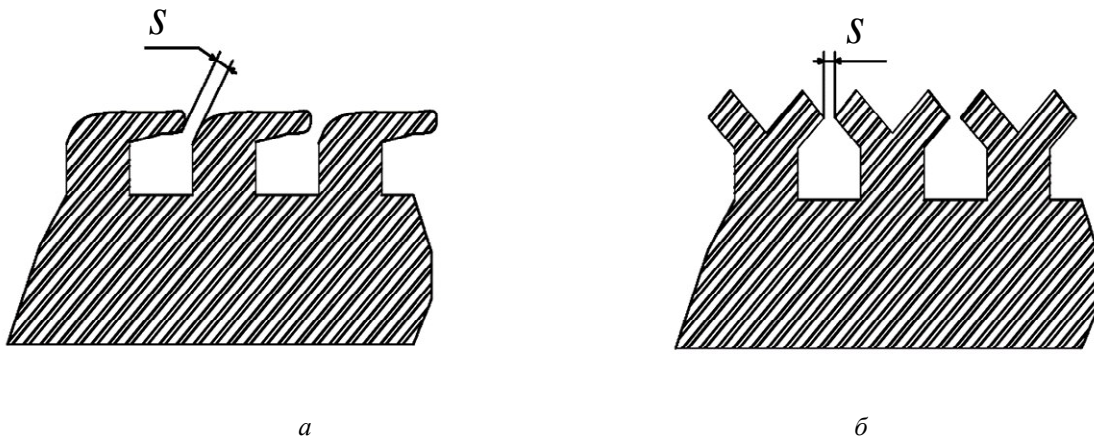


Рис. 1. Эскизы ребер с частично замкнутым объемом экспериментальных труб:
а – Г-профиля; б – Y-профиля; s – зазор

Геометрические параметры экспериментальных труб представлены в таблице, в которой приняты следующие обозначения: $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр экспериментальной трубы, мм; $d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр трубы, мм; $F_{\text{нар}}$ – наружная поверхности трубы, м²; $F_{\text{вн}}$ – внутренняя поверхности трубы, м²; $\beta = F_{\text{нар}}/F_{\text{вн}}$ – коэффициент оребрения; s – величина щелевого зазора, мм; h_p – высота ребра, мм; S_p – шаг между осями ребер, мм; S_p' – расстояние между ребрами, мм; R_z – шероховатость поверхности трубы, мкм.

Геометрические параметры экспериментальных труб

№	Тип трубы	$d_{нар}$, мм	$d_{вн}$, мм	S_p , мм	S_p' , мм	s , мм	h_p , мм	β	$F_{нар}$, м ²	$F_{вн}$, м ²	R_z , мкм
1	Стандартная оребренная	21	13,2	2	1,6	–	2,25	3,64	0,0437	0,012	4...5
2	Ребра с Г-профилем	20,5	13,2	2		0,25	2	3,82	0,0458	0,012	4...5
3	Ребра с Y-профилем	21	13,2	2		0,25	2,25	4,2	0,0504	0,012	4...5
4	Ребра с Г-профилем	20,5	13,2	2		0,50	2	3,82	0,0458	0,012	4...5
5	Ребра с Y-профилем	21	13,2	2		0,50	2,25	4,2	0,0504	0,012	4...5

Трубы с ЧЗО запатентованы [3, 4].

Результаты исследований

Результаты исследований при кипении чистого хладагента R410A. При анализе механизмов теплопереноса при кипении на трубах с ЧЗО установлено три возможных режима кипения во внутреннем канале.

«Затопленный» режим имеет место при низкой плотности теплового потока, где большую часть объема в канале занимает жидкость, и небольшое количество активных мест, в качестве которых выступают отдельные центры парообразования.

При более высокой плотности теплового потока происходит переход в режим «всасывание – кипение», когда жидкость всасывается во внутреннее пространство канала через зазоры путем откачки, при отрыве пузыря от поверхности нагрева.

В области критических значений плотности теплового потока реализуется «сухой» режим, когда практически все внутреннее пространство канала заполнено паром и кипение в пузырьках происходит на нагретой стенке за пределами канала. Установлено, что высокая интенсивность теплообмена при кипении имеет место в основном в режиме «всасывание – кипение», т. к. небольшой диаметр и эффекты входной области дают очень большой ламинарный коэффициент теплоотдачи для потока жидкости (внутренняя конвекция).

В ходе визуального наблюдения за процессом кипения на оребренной трубе и трубах с ЧЗО отмечалось, что при снижении давления насыщения развитое пузырьковое кипение R410A началось при больших значениях плотности теплового потока. С помощью камеры отмечалось, что на трубах с ЧЗО процесс возникновения, роста и отрыва пузырей интенсивнее, чем на оребренной. Самый интенсивный процесс кипения возникает на трубах Y-профиля (трубы № 3), наихудший – на оребренной трубе. Установлено, что кипение хладагента R410A на трубах с ЧЗО началось при меньших значениях плотности теплового потока по сравнению с оребренной трубой.

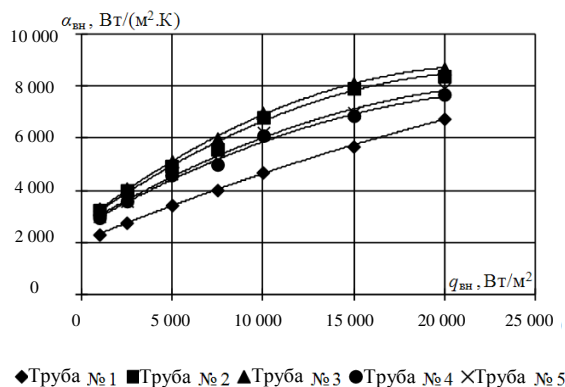
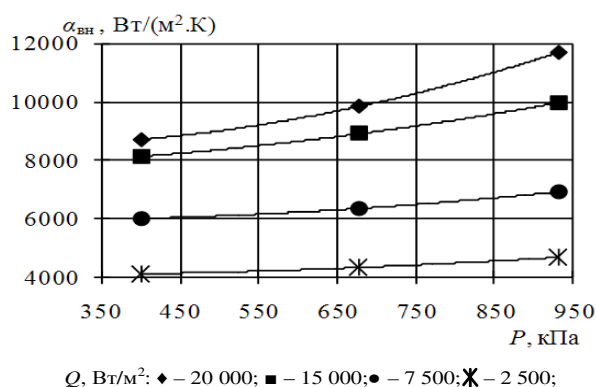
При визуальном наблюдении за процессом кипения можно сделать выводы о том, что вследствие особенностей конструкции ЧЗО создаются условия, благоприятные для возникновения, роста и отрыва паровых пузырей, и поэтому процесс кипения на трубах с ЧЗО должен характеризоваться большим коэффициентом теплоотдачи, чем при кипении на оребренной трубе.

Зависимость коэффициента теплоотдачи, отнесенного к внутренней поверхности трубы, от плотности теплового потока ($\alpha_{вн} = f(q_{вн})$) для всех труб при температуре насыщения $t_{н} = -20$ °C представлена на рис. 2.

Видно, что коэффициент теплоотдачи растет с увеличением плотности теплового потока. Аналогично получены зависимости для $t_{н} = -5$ и $+5$ °C.

Таким образом, результаты экспериментов при кипении хладагента R410A демонстрируют повышение α с ростом q . Это объясняется тем, что с увеличением тепловой нагрузки увеличивается число действующих центров парообразования и, следовательно, теплообмен должен улучшаться.

Зависимость коэффициента теплоотдачи, отнесенного к внутренней поверхности трубы, от давления ($\alpha_{вн} = f(p)$) для трубы Y-профиля с величиной щелевого зазора 0,25 мм (трубы № 3) представлена на рис. 3.

Рис. 2. График $\alpha_{\text{вн}} = f(q_{\text{вн}})$ для всех видов труб при $t_{\text{н}} = -20^\circ\text{C}$ Рис. 3. График $\alpha_{\text{вн}} = f(p)$ для трубы №3 при разных значениях плотности теплового потока

Из рис. 3 видно, что коэффициент теплоотдачи возрастает с увеличением давления при всех значениях плотности теплового потока для трубы №3. При кипении на экспериментальных трубах №1, 2, 4, 5 также видно, что α растет с увеличением давления при всех значениях плотности теплового потока. Это явление можно объяснить тем, что увеличение давления приводит к уменьшению критического радиуса, а следовательно, к увеличению числа действующих центров парообразования. С увеличением давления увеличивается также частота отрыва пузырей от центров парообразования. Отмечено, что коэффициент теплоотдачи пропорционален числу действующих центров парообразования. Вследствие этого интенсивность кипения увеличивалась с повышением давления. Эти выводы соответствуют экспериментальным данным, представленным в разных работах.

С уменьшением величины щелевого зазора влияние давления на коэффициент теплоотдачи увеличивается. Так как свойства труб с большей величиной щелевого зазора близки к свойствам оребренной трубы, влияние конвекции в каналах труб с ЧЗО с большей величиной щелевого зазора меньше, чем у труб с ЧЗО с меньшей величиной щелевого зазора.

В ходе исследований установлено, что в диапазоне, в котором проводятся эксперименты, коэффициент теплоотдачи при кипении на четырех трубах с ЧЗО больше, чем при кипении на оребренной трубе при α , отнесенном к внутренней поверхности труб.

Повышенные значения коэффициента теплоотдачи могут быть обусловлены изменениями гидродинамических условий в непосредственной близости от существующих центров парообразования. Это связано с тем, что при отходе пузыря и теплого жидкого хладагента от поверхности нагрева их место занимает менее нагретый жидкий хладагент. При использовании стандартных оребренных труб холодный жидкий хладагент движется на открытые участки центров парообразования. Здесь необходим относительно большой тепловой поток, чтобы довести холодный жидкий хладагент до начала кипения. Напротив, в трубах с ЧЗО ограничивается поток хо-

лодного жидкого хладагента из объема, благодаря малой величине зазора между ребрами. Вследствие этого кипение на трубах с ЧЗО должно характеризоваться большими значениями коэффициента теплоотдачи, чем на оребренных трубах.

Из рис. 2 можно заметить, что коэффициент теплоотдачи при кипении на трубах № 3 больше, чем при кипении на трубах № 2, а коэффициент теплоотдачи при кипении на трубах № 5 больше, чем при кипении на трубах № 4. Это говорит о том, что коэффициент теплоотдачи при кипении на трубах с Y-профилем больше, чем коэффициент теплоотдачи при кипении на трубах с Г-профилем (при одинаковом размере зазора). Это связано с тем, что Y-профиль увеличивает площадь, занимаемую микрослоем жидкости, отделяющей паровой пузырь от греющей стенки, значительно, чем Г-профиль, кроме того, Y-профиль имеет больший коэффициент оребрения.

Результаты исследований при кипении хладагента R410A и его смеси с маслом BSE 32

С целью сравнения коэффициентов теплоотдачи при кипении на трубах при разных концентрациях масла и температуре насыщения $t_n = -20^\circ\text{C}$ для всех труб построим график $\alpha_m = f(q_{вн})$ (рис. 4).

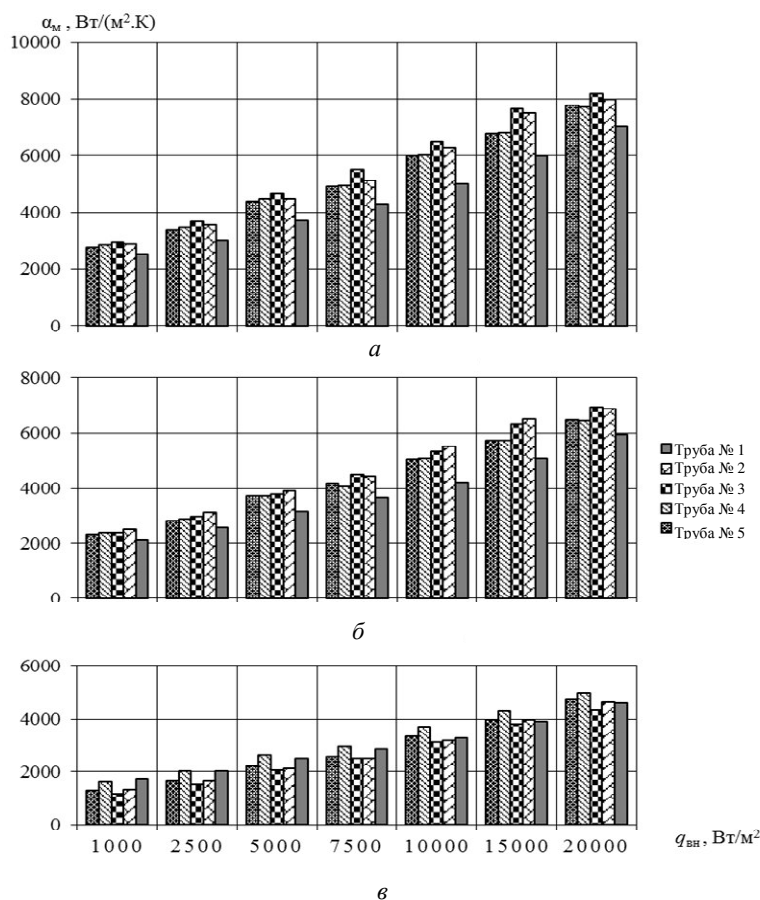


Рис. 4. График $\alpha_m = f(q_{вн})$ при кипении на трубах при разных концентрациях масла: $a - \xi = 2\%$; $б - \xi = 5\%$; $в - \xi = 10\%$ и при температуре насыщения $t_n = -20^\circ\text{C}$

Установлено, что концентрация масла ξ_m свыше 5 % приводит к монотонному снижению коэффициента теплоотдачи во всех случаях. При концентрации $\xi_m = 10\%$ резко ухудшается теплообмен во всех случаях, особенно на трубах с развитыми поверхностями теплообмена. Наличие масла ухудшает теплообмен при кипении хладагентов на трубах с ЧЗО сильнее, чем на оребренных поверхностях. При концентрации $\xi_m = 2\%$ и $\xi_m = 5\%$ коэффициент теплоотдачи при кипении на трубе с ЧЗО больше, чем при кипении на оребренной трубе. Однако при $\xi_m = 10\%$ коэффициент теплоотдачи при кипении на трубе с ЧЗО становится меньше, чем при кипении на оребренной трубе (рис. 4) и поэтому концентрацию масла в судовом испарителе следует поддерживать на уровне не более 5 %.

Выводы и рекомендации

При кипении фреонов на трубках с ЧЗО в области значений плотности теплового потока и давления, характерных для судовых испарителей холодильных машин, коэффициент теплоотдачи при кипении хладагента на наружной поверхности труб существенно больше, чем при кипении на оребренных трубах. Применение труб с ЧЗО эффективнее, чем оребренных в кожухотрубных испарителях судовых холодильных машин. Применение труб с ЧЗО является перспективным методом повышения эффективности работы судового горизонтального испарителя затопленного типа. Его можно рекомендовать при проектировании новых компактных судовых испарителей, а также для модернизации существующих аппаратов. Применение труб с ЧЗО при кипении хладагентов в судовых испарителях в области плотностей теплового потока и давлений, характерных для судовых испарителей холодильных машин и систем кондиционирования воздуха на судах, по основным показателям не уступает наиболее распространённым в настоящее время методам интенсификации теплообмена, а по некоторым критериям даже превосходит их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хо Вьет Хынг*. Перспективность применения испарителей с развитой теплообменной поверхностью труб в судовых системах микроклимата / Хо Вьет Хынг // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2013. № 1. С. 143–147.
2. *Букин В. Г.* Результаты исследования кипения озонобезопасного хладагента R410A в испарителях холодильных машин / В. Г. Букин, Хо Вьет Хынг // Юг России: экология, развитие. 2012. № 4. С. 18–21.
3. *Испаритель*: пат. РФ № 89680 / Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Васильев В. Н., Бирюлин И. В.; опубл. 10.12.2009.
4. *Теплообменная труба*: пат. РФ № 123910 / Букин В. Г., Букин А. В., Хо Вьет Хынг; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

REFERENCES

1. Kho V'et Khyng. Perspektivnost' primeneniia isparitelei s razvitoi teploobmennoi poverkhnost'iu trub v sudovykh sistemakh mikroklimate [Perspectives of use of evaporators with developed heat transfer surface of tubes in ship microclimate systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2013, no. 1, pp. 143–147.
2. Bukin V. G., Kho V'et Khyng. Rezul'taty issledovaniia kipeniia ozonobezopasnogo khladagenta R410A v ispariteliakh kholodil'nykh mashin [Results of research of boiling of ozone-safe refrigerant R410A in evaporators of refrigerating machines]. *Iug Rossii: ekologiia, razvitie*, 2012, no. 4, pp. 18–21.
3. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Vasil'ev V. N., Biriulin I. V. *Isparitel'* [Evaporator]. Patent RF, no. 89680.
4. Bukin V. G., Bukin A. V., Kho V'et Khyng. *Teploobmennaiia truba* [Heat transfer tube]. Patent RF, no. 123910.

Статья поступила в редакцию 15.04.2013

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Bukin Vladimir Grigorevich – Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department "Refrigerating 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 "Refrigerating Machine"; Hoviethung81@yahoo.com.