

ВЛИЯНИЕ МАСЛА НА ТЕПЛООТДАЧУ СМЕСЕВОГО ХЛАДАГЕНТА, КИПЯЩЕГО В ТРУБАХ ИСПАРИТЕЛЕЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

В. Г. Букин, А. В. Букин, А. В. Ежов, С. С. Иванов

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Изложены результаты экспериментального исследования влияния масла на интенсивность теплоотдачи при кипении смесового хладагента R406A. Поскольку в системе кондиционирования воздуха находится не чистый хладагент, а его смесь с маслом с концентрацией до 8 процентов, такое количество масла оказывает влияние как на гидродинамику, так и на теплообмен в испарителях. Экспериментальная работа охватывает весь диапазон изменения режимных параметров, характерный для данных систем. Представлен характер изменения концентрации масла в трубе по мере выкипания рабочего тела, подтверждающий, что на большей части трубы масло не ухудшает теплообмен при кипении двухфазного потока. Выявлены различные режимы движения кипящего потока хладагента R406A, и в каждом из них даётся количественная оценка влияния масла и объяснение этого влияния на гидродинамику и теплоотдачу на основании визуальных наблюдений и результатов эксперимента. Главным фактором воздействия является фреономасляная пена, увеличивающая долю смоченной поверхности в волновом и расслоенном режимах и интенсивность теплоотдачи до 30 процентов. Выполнено сопоставление коэффициентов теплоотдачи как по сечению, так и по длине трубы, свидетельствующее, что максимальное изменение теплоотдачи происходит в верхней части поверхности, благодаря образованию на ней сухой стенки и смачиванию её фреономасляной пеной. Произведено сравнение интенсивности теплообмена чистого хладагента R406A и, при наличии в нём масла, показано, что влияние масла имеет сложный и неоднозначный характер. Предложены расчётные и критериальные зависимости для расчёта коэффициентов теплоотдачи в различных режимах.

Ключевые слова: теплоотдача, гидродинамика, холодильный агент, масло, кипение, двухфазный поток, фреономасляная пена.

Для цитирования: Букин В. Г., Букин А. В., Ежов А. В., Иванов С. С. Влияние масла на теплоотдачу смесового хладагента, кипящего в трубах испарителей холодильных машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 3. С. 88–93. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-88-93.

Введение

После прекращения применения по экологическим требованиям в системах кондиционирования воздуха популярных фреонов, которые являлись чистыми веществами, взамен им предложены многокомпонентные хладагенты, например R406A, являющийся зеотропной смесью, имеющей значительную неизотермичность при фазовых переходах. Данный хладагент кипит в трубах испарителей или воздухоохладителей. Испарители с внутритрубным кипением имеют меньшую заправку рабочим телом, но и меньший коэффициент теплоотдачи при кипении, что приводит к необходимости увеличения теплообменной поверхности.

Кипение хладагента в трубе определяет сложную гидродинамику двухфазного потока по мере изменения паросодержания, которая во многом определяет интенсивность теплообмена [1–3]. Всё это говорит о неоднозначности и сложности процесса теплоотдачи при внутритрубном кипении, который усугубляется наличием растворимого во фреоне масла. Масло при некоторых рабочих концентрациях вспенивается и искажает гидродинамику потока и интенсивность теплоотдачи при кипении. Кроме того, наличие масла до 8 % заметно изменяет такие свойства рабочего тела, как вязкость, теплопроводность, что также отразится на теплоотдаче.

Для смазки деталей компрессоров используется синтетическое масло BSE 32, хорошо растворимое с фреоном и циркулирующее с ним в системе. Как подтвердили специальные исследования [1], унос масла из компрессора составляет 0,4–1,2 % рабочего тела, а с учётом отделения примерно 50 % в маслоотделителе унос в конденсатор и далее в испаритель составит 0,2–0,6 %.

При внутритрубном кипении в испарителе по ходу движения хладагента концентрация масла ξ_m увеличивается. Поскольку в компрессор не должна поступать жидкость, её выкипание в испарителе должно быть практически полным, до 90÷95 %. Оставшийся жидкий холодильный агент испаряется в теплообменнике и всасывающем трубопроводе, а чистое масло поступает в компрессор малыми, не опасными порциями.

Материалы и результаты исследования

Эксперименты проводились на специальном стенде с хладагентом R406A в трубе длиной 3,3 м, диаметром 13 мм, толщиной стенки 0,5 мм, выполненной из стали 1X18НТ. Диапазон изменения режимных параметров: массовая скорость $w_p = 30 \div 150$ кг/(м²·с); температура кипения $t_0 = 5 \div -20$ °С; плотность теплового потока $q = 1 \div 10$ кВт/м². Концентрация масла на входе в трубу $\xi_m = 0 \div 4$ %. Для визуальных наблюдений на входе и выходе трубы установлены стеклянные трубки.

На рис. 1 представлено изменение концентрации масла по длине трубы в испарителе с внутритрубным кипением.

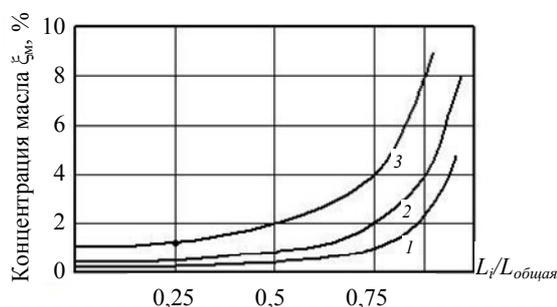


Рис. 1. Зависимость $\xi_m = f(L)$ при полном выкипании хладагента R406A в испарителе с внутритрубным кипением при начальной концентрации масла:
 1 – $\xi_m = 0,25$ %; 2 – $\xi_m = 0,5$ %; 3 – $\xi_m = 1$ %

Согласно рис. 1 на выходе из трубы испарителя концентрация масла ξ_m не превышает 5–6 %, а на большей её части $\xi_m - 3$ %.

Выполненные ранее исследования подтвердили, что при концентрации масла меньше 3 % интенсивность кипения хладагента становится больше, чем при кипении чистого рабочего вещества [2]. Также отмечено, что при $\xi_m < 0,4$ % гидродинамика потока хладагента не изменится, а при больших концентрациях при кипении в трубах отмечается пенообразование, поэтому влияние масла на гидродинамику кипящего R406A в испарителе, безусловно, скажется.

Степень влияния масла на теплообмен зависит от режима движения потока. Хладагент поступает в испаритель после дросселирующего клапана при паросодержании $X = 0,1 \div 0,15$ кг/кг. Это соответствует снарядному или волновому движению потока. Эмульсионный поток может быть при насосной подаче.

В эмульсионном потоке добавка масла практически не влияет на теплообмен, поскольку теплоотдача α определяется в основном скоростью движения жидкости, а при такой концентрации масла ξ_m свойства рабочего вещества практически не изменяются и пенообразования нет.

Коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (1)$$

При снарядном режиме движения потока наличие масла также не влияет на теплообмен, поскольку масляная пена находится внутри пузыря и не соприкасается с теплопередающей поверхностью [4]. И в этом режиме теплоотдача $\alpha_{кон}$ определяется скоростью движения потока, а кипение $\alpha_{кип}$ мало интенсифицирует теплообмен.

При обработке опытных данных в снарядном режиме получена зависимость

$$\alpha = \alpha_{кон} \sqrt[3]{1 + \alpha_{кип} \alpha_{кон}^3} \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции жидкости $\alpha_{\text{кон}}$ рассчитывается по (1) по истинной скорости жидкости, а $\alpha_{\text{кип}}$ – по зависимости

$$\text{Nu} = 2,38 K_p^{0,25} (\text{Pe} \cdot K_t^{0,63} K_G^{0,5})^{0,75},$$

где $K_G = \tau/q \cdot \sqrt{\delta/q \cdot (p' - p'')}$ – характеризует соотношение между теплотой испарения и свободной энергией поверхностного слоя.

В волновом режиме наличие масляной пены значительно увеличивает смоченную поверхность. При режимах, которые для чистого хладагента соответствовали волновому режиму, при наличии масла вся теплообменная поверхность оказалась смоченная волной или масляной пеной.

На рис. 2 приведён график распределения температуры по стенке трубы в одном сечении по отношению к t_0 при волновом режиме с маслом и без него.

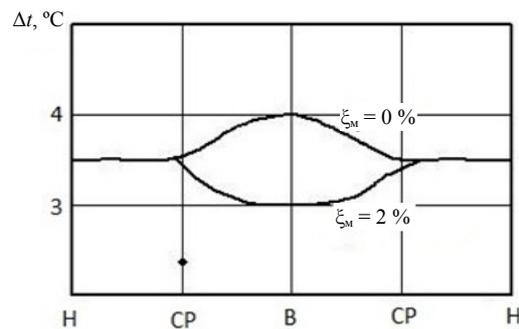


Рис. 2. Распределение температур по стенке трубы при волновом режиме с маслом и без масла при $\omega\rho = 100 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 2 \text{ кВт}/\text{м}^2$; $P = 0,539 \text{ МПа}$

При $\xi_m = 0$ температура в верхней части трубы больше, чем в нижней, что объясняется наличием сухой стенки.

Интенсивность теплоотдачи, связанная с кипением, ещё не велика, поскольку в этих режимах отмечается неразвитое кипение.

Интенсификация теплообмена при наличии масла происходит в основном за счёт увеличения доли смоченной поверхности в верхней части трубы. Влияние масла на α в этом режиме неоднозначно. Как подтвердили визуальные наблюдения, при $\xi_m < 0,4 \%$ этого влияния нет, поскольку нет пенообразования, а концентрация масла практически не изменяет свойств рабочего тела. Рост $\xi_m > 3 \%$ приводит к снижению теплоотдачи.

На рис. 3 и 4 представлено увеличение коэффициента теплоотдачи при наличии масла по сравнению с α чистого хладагента R406A.

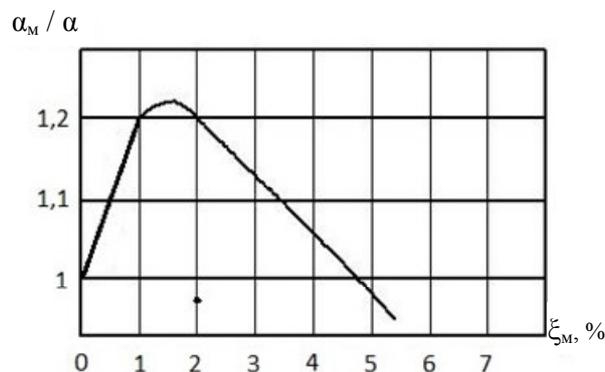


Рис. 3. Отношение коэффициентов α масла / α чистого хладагента при волновом режиме: $\omega\rho = 50 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 2 \text{ кВт}/\text{м}^2$; $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$

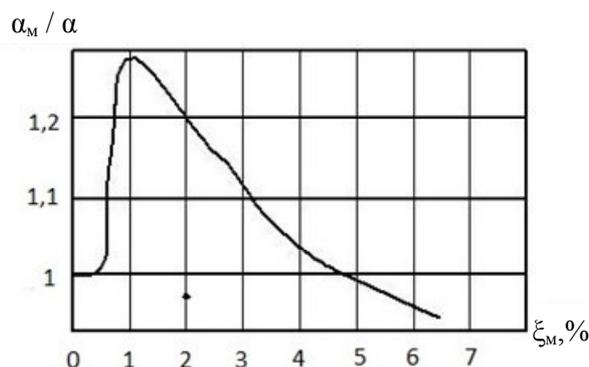


Рис. 4. Отношение коэффициентов α масла / α чистого хладагента при расслоенном режиме:
 $\omega_p = 100 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 2 \text{ кВт}/\text{м}^2$; $t = -20 \text{ }^\circ\text{C}$

В начале режима, который соответствует расслоенному при кипении чистого хладагента, верхняя часть трубы остаётся смоченной масляными пробками, которые движутся большими объёмами по поверхности жидкости или летящими в паровом объёме малыми порциями. На рис. 5 приведено распределение температур в сечении трубы при параметрах, которые определяют расслоенный режим течения чистого хладагента.

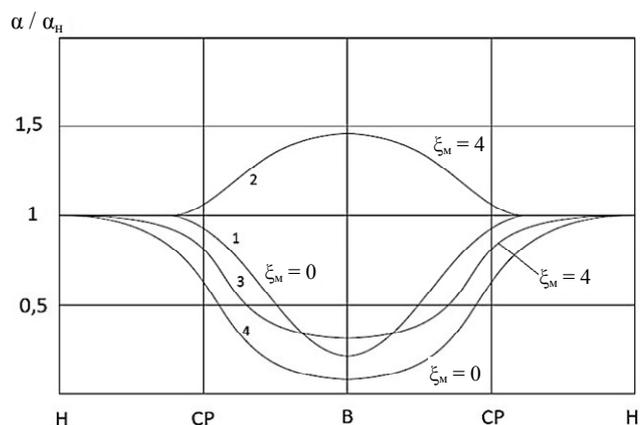


Рис. 5. Отношение α/α_n в сечении трубы при расслоенном режиме:
 $\omega_p = 50 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 2 \text{ кВт}/\text{м}^2$; $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$; 1, 2 – в начале режима, 3, 4 – в конце трубы

Максимальная теплоотдача в начале режима отмечена в верхней части, т. к. она смачивается пеной. В конце трубы при паросодержании $X = 0,90 \div 0,95 \text{ кг}/\text{кг}$ визуально отмечено наличие слабокипящего ручья у нижней образующей трубы с небольшой шапкой пены. В паровой области пены нет. Здесь теплоотдача определяет скорость движения пара и $\alpha_{\text{кип}}$ фреонмасляного раствора с высоким содержанием масла.

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при расслоенном режиме движения двухфазного потока, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, можно предложить зависимость

$$\alpha = \alpha_{\text{ж}} \frac{F_{\text{см}}}{F} + \alpha_n \left(1 - \frac{F_{\text{см}}}{F}\right), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{ж}}$ – коэффициент теплоотдачи кипящей жидкости; α_n – коэффициент теплоотдачи движущегося пара; $F_{\text{см}}$ – смоченная поверхность сечения трубы, м^2 ; F – периметр сечения трубы, м^2 .

Заключение

Расчёт по формуле (3) подтвердил хорошую сходимость с результатами эксперимента.

В результате исследования влияния масла на гидродинамику и теплообмен двухфазного кипящего потока хладагента R406A:

- получены расчётные формулы и критериальные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении хладагента R406A с маслом в трубах испарителей охлаждающих систем;
- произведена оценка влияния масла на гидродинамику двухфазного потока;
- определено влияние масла на теплоотдачу при кипении как по сечению трубы, так и по её длине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Экспериментальное исследование малых холодильных установок на смеси R22/142b // Холодильная техника. 1996. № 5. С. 12–15.
2. Комаров В. В., Шуришев В. Ф., Букин В. Г. Теплоотдача при кипении смеси R12/22 с маслами на трубе // Исследование теплофизических свойств веществ и процессов теплообмена в холодильной технике. Л.: Изд-во Ленинград. технол. ин-та, 1989. С. 90–94.
3. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Влияние добавки масла при кипении смеси R22/142b внутри горизонтальной трубы на гидродинамику потока // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI в.: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 06–07 июня 2001 г.). СПб.: Изд-во СПбГУНиПТ, 2001. С. 139–144.
4. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Исследования интенсивности теплоотдачи и механизм процесса кипения бинарных неазеотропных смесей // Совершенствование энергетических систем и комплексов: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во ГТУ, 2000. С. 24–32.

Статья поступила в редакцию 26.03.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Букин Владимир Григорьевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

Букин Александр Владимирович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

Ежов Алексей Васильевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

Иванов Сергей Сергеевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; студент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.



EFFECT OF OIL ON HEAT TRANSFER OF MIXED REFRIGERANT BOILING IN EVAPORATOR TUBES IN REFRIGERATION MACNINES

V. G. Bukin, A. V. Bukin, A. V. Ezhov, S. S. Ivanov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of oil on the heat transfer rate at boiling of mixed refrigerant R406A. Since the air conditioning system is not a pure refrigerant, but a mixture of oil with a concentration of up to 8%, such an amount of oil affects both hydrodynamics and heat exchange in the evaporators. The experimental work covers the entire range of regime parameters typical for these systems. There is shown the process of changing oil concentration in the pipe, as the working fluid boils, proving that most of the oil pipe does not impair the heat exchange in the course of two-phase flow boiling. Different modes of refrigerant

R406A boiling dynamics have been defined, and each mode is given a quantitative assessment in terms of the effects of the oil and explaining of this effect on the fluid flow and heat transfer based on visual observations and the experiment results. The main factor of the effect is the freon-oil foam, which increases the proportion of the wetted surface in the wave and stratified modes and the heat transfer rate to 30%. A comparison of the heat transfer coefficients both in the cross section and along the pipe length has been performed, showing that the maximum change in heat transfer occurs in the upper part of the surface due to developing a dry wall on it and wetting it with freon-oil foam. A comparison of the heat transfer rate of pure refrigerant R406A has been done; the presence of oil in it shows that the effect of oil is complex and ambiguous. Calculation and criterion dependences for calculation of heat transfer coefficients in different modes have been proposed.

Key words: heat transfer, hydrodynamics, refrigerant, oil, boiling, two-phase flow, freon oil foam.

For citation: Bukin V. G., Bukin A. V., Ezhov A. V., Ivanov S. S. Effect of oil on heat transfer of mixed refrigerant boiling in evaporator tubes in refrigeration machines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;3:88-93. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-88-93.

REFERENCES

1. Bukin V. G., Kuz'min A. Yu. Eksperimental'noe issledovanie malyh holodil'nyh ustanovok na smesi R22/142b [Experimental study of small refrigeration units using a mixture of R22 / 142b]. *Holodil'naya tekhnika*, 1996, no. 5, pp. 12-15.
2. Komarov V. V., Shurshev V. F., Bukin V. G. Teplootdacha pri kipenii smesi R12/22 s maslami na trube [Heat transfer of boiling mixture R12 / 22 with oils on the pipe]. *Issledovanie teplofizicheskikh svoystv veshchestv i processov teploobmena v holodil'noj tekhnike*. Leningrad, Izd-vo Leningradskogo tekhnologicheskogo in-ta, 1989. Pp. 90-94.
3. Bukin V. G., Kuz'min A. Yu., Ezhov A. V. Vliyaniye dobavki masla pri kipenii smesi R22/142b vnutri gorizonta'lnoj trubyy na gidrodinamiku potoka. Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI v. [Influence of adding oil on hydrodynamics of boiling mixture R22 / 142b inside a horizontal pipe. Low-temperature and food technologies in the XXI century]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 06–07 iyunya 2001 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGUNIPT, 2001. Pp. 139-144.
4. Bukin V. G., Kuz'min A. Yu., Ezhov A. V. Issledovaniya intensivnosti teplootdachi i mekhanizm processa kipeniya binarnyyh neazeotropnykh smesey [Studying the intensity of heat transfer and mechanism of boiling process of binary non-azeotropic mixtures]. *Sovershenstvovaniye energeticheskikh sistem i kompleksov: sbornik nauchnykh trudov*. Saratov, Izd-vo GTU, 2000. Pp. 24-32.

The article submitted to the editors 26.03.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bukin Vladimir Grigorevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Power System and Chillers; bukinv@mail.ru.

Bukin Aleksandr Vladimirovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Assistant Professor of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinv@mail.ru.

Ezhov Alexey Vasilievich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinv@mail.ru.

Ivanov Sergey Sergeevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Student of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinv@mail.ru.

