

УДК 658.261:621.56

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ СМЕСЕВЫХ ХЛАДАГЕНТОВ И ИХ МАСЛОФРЕОНОВЫХ СМЕСЕЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

А. В. ОВСЯННИК, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ, В. П. НИКИТЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Разработана методика проведения экспериментального исследования конденсации фреонов (R404A, R407C и R410A) и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях. В качестве исследуемой поверхности теплообмена выступала гладкая и продольно оребренная поверхность с трапецевидной формой ребра. В результате экспериментальных исследований определены температуры основной поверхности и ребра в основании, в середине и на вершине, фиксируемые термодатчиками при различных плотностях тепловых потоков и концентрациях масла при исследовании маслофреоновых смесей. Для анализа полученных результатов разработана методика определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации указанных фреонов. В результате проведенных исследований получены значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации паров чистых смесевых хладагентов и их маслофреоновых смесей с концентрацией масла 0, 5 и 10 % на гладких и оребренных поверхностях. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии концентрации масла на коэффициент теплоотдачи при различных значениях плотности теплового потока.

Ключевые слова: конденсация, хладагент, коэффициент теплоотдачи, фреон, экспериментальная установка, методика, маслофреоновая смесь.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT EXCHANGE DURING CONDENSATION OF MIXED REFRIGERANTS AND THEIR OIL-FREON MIXTURES ON HORIZONTAL HEAT EXCHANGE SURFACES

A. V. OVSYANNIK, U. P. KLIUCHINSKI, V. P. NIKITENKO

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A methodology was developed for conducting an experimental research of the condensation of freons (R404A, R407C and R410A) and their oil-freon mixtures on smooth and developed horizontal surfaces. A smooth and longitudinally finned surface with a trapezoidal rib shape acted as the studied heat exchange surface. As a result of experimental research, the temperatures of the main surface and ribs at the base, in the middle and at the apex, fixed by thermocouples at different densities of heat flows and oil concentrations during the research of oil-freon mixtures, were determined. To analyze the obtained results, a method for determining heat transfer coefficients during condensation of these freons was developed. As a result of research, values of heat transfer coefficients are obtained during condensation of vapors of pure mixed refrigerants and their oil-freon mixtures with oil concentration of 0, 5 and 10 % on smooth and finned surfaces. The results show the effect of oil concentration on heat transfer coefficient at different values of heat flux density.

Keywords: condensation, refrigerant, heat transfer coefficient, freon, experimental plant, procedure, oil-freon mixture.

Введение

Одной из важных проблем холодильной техники является экономия энергоресурсов и применение в холодильной технике озонобезопасных хладагентов. Таким образом, массогабаритные показатели являются одним из важных критериев при выборе теплообменных аппаратов, которые, безусловно, оказывают влияние и на их стоимость. Решение данной проблемы должно быть основано на научно обоснованных и экспериментально проверенных методах интенсификации теплообмена при конденсации.

Современные холодильные и теплонасосные установки в качестве рабочих тел используют озонобезопасные фреоны с низким потенциалом глобального потепления. Однако присутствие в установках компрессорного оборудования приводит к неизбежному появлению в фреонах некоторого количества масла и образованию маслофреоновой смеси. Наличие маслофреоновой смеси приводит к изменению не только интенсивности теплоотдачи при кипении и конденсации, но и к изменению механизма этих процессов. Таким образом, возникает необходимость в исследовании процессов фазовых переходов маслофреоновых смесей на горизонтальных теплообменных поверхностях конденсаторов холодильных и теплонасосных установок.

Цель работы – провести экспериментальное исследование теплообмена фреонов при конденсации их маслофреоновых смесей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику проведения экспериментального исследования конденсации фреонов (R404A, R407C и R410A) и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях;
- разработать методику определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации фреонов (R404A, R407C и R410A) и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях;
- провести анализ результатов, полученных в ходе проведения экспериментального исследования конденсации фреона R404A на гладких и развитых горизонтальных поверхностях.

Основная часть

Методика проведения экспериментального исследования конденсации фреонов на гладких и развитых горизонтальных поверхностях. Для исследования теплообмена при кипении и конденсации жидкостей, озонобезопасных хладагентов и маслофреоновых смесей на теплоотдающих поверхностях на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого была разработана комплексная экспериментальная установка [1], представленная на рис. 1.

Измерительная система для камеры конденсации представляет собой комплекс, состоящий из аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES и компьютера Intec-483. Управление процессом измерений производится программой обработки данных ADC32GD 1.0. Обмен управляющими сигналами и сигналами обратной связи между компьютером и измерительными приборами происходит посредством измерительных шин. Автоматический опрос термодпар осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533, далее измеренное значение температур в виде термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) поступает на компьютер, где программой обработки данных ADC32GD 1.0 производится перевод значений термо-ЭДС в градусы. Холодные спаи термодпар, благодаря которым поддерживается температура насыщения внутри экспериментальной каме-

ры, помещается в термостат, где поддерживается температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нагреватель рабочего участка подключается к сети 220 В через лабораторный автотрансформатор РНО-250-5. Для определения подводимой мощности сила тока измеряется амперметром типа Д553, напряжение – вольтметром типа Э-378. Регулировка мощности, подводимой к нагревателю, производится лабораторным автотрансформатором РНО-250-5. Измерительная система работает в циклическом режиме опроса термодпар через определенный промежуток времени. Скорость опроса составляет 10 измерений в секунду.

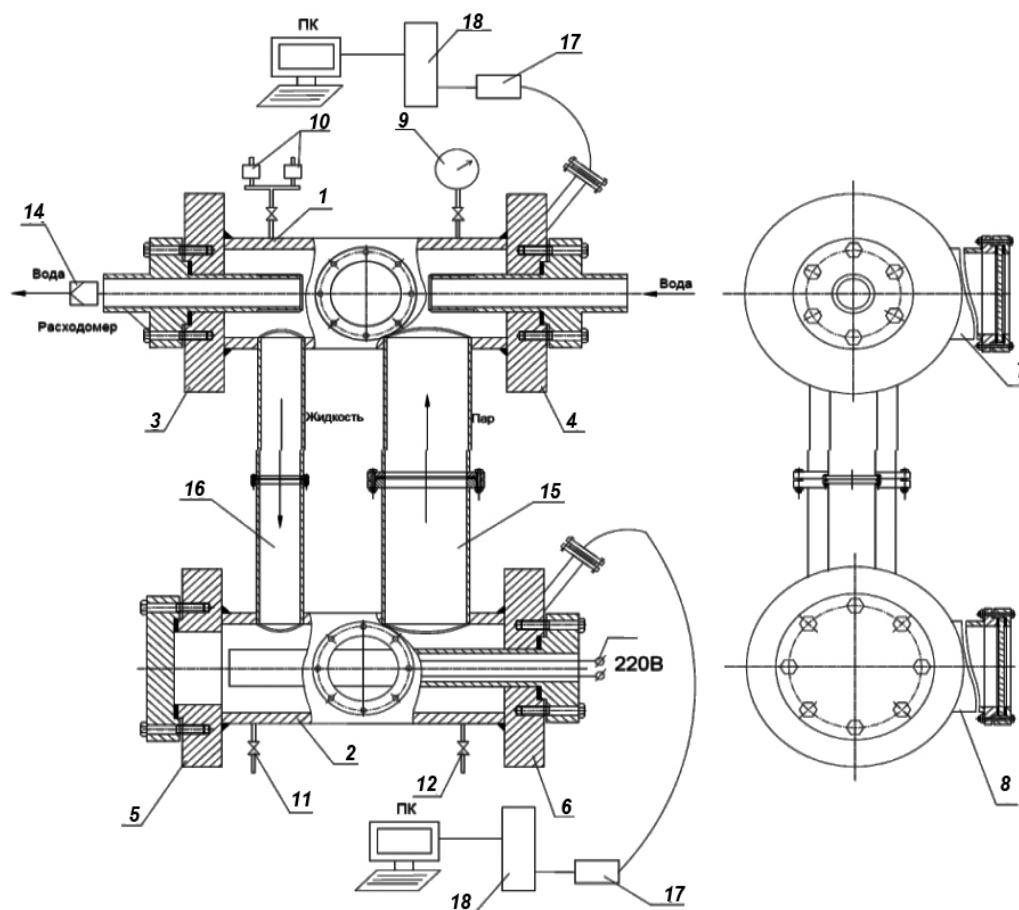


Рис. 1. Схема комплексной экспериментальной установки [2, 3]:
 1, 2 – рабочие камеры; 3–6 – фланцы; 7, 8 – смотровые иллюминаторы;
 9 – манометр; 10 – предохранительный клапан; 11, 12 – вентиль;
 13 – нагреватель; 14 – расходомер; 15 – паровой канал; 16 – жидкостной канал;
 17 – аналого-цифровой преобразователь; 18 – компьютер

В качестве исследуемой поверхности выступала продольно оребренная поверхность с трапецевидной формой ребра (рис. 2).

Исходные данные, полученные в ходе проведения эксперимента: габаритные размеры исследуемой поверхности теплообмена (рис. 2); температуры на гладкой и оребренной поверхности, согласно местам расположения термодпар (рис. 3); плотность теплового потока на гладкой поверхности; температура насыщения.

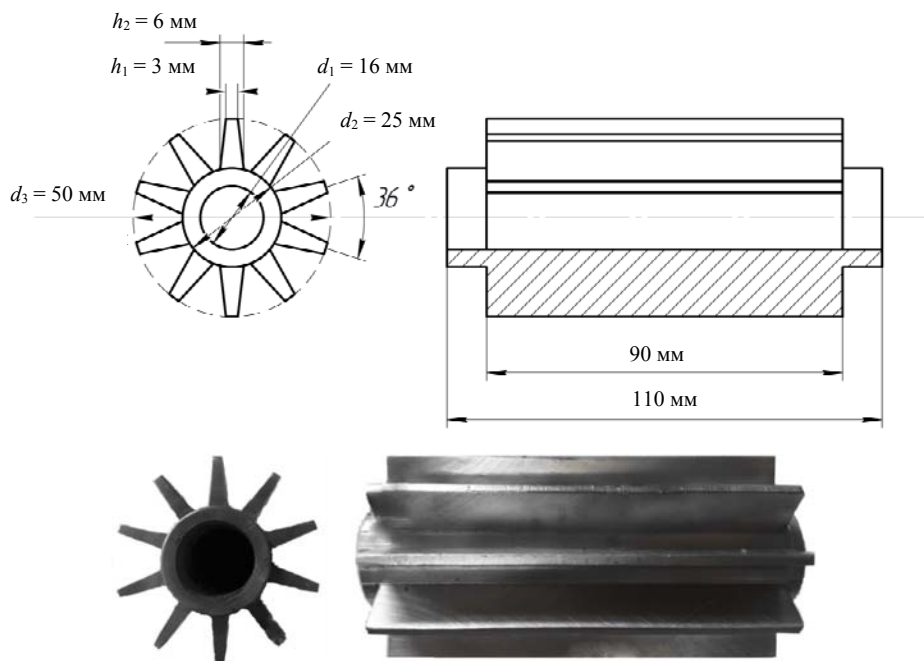


Рис. 2. Иллюстрация исследуемой поверхности теплообмена

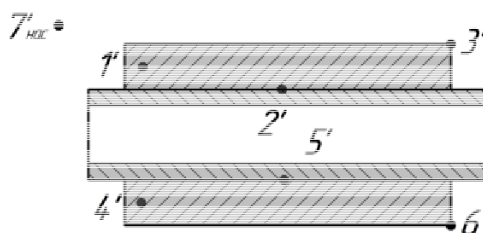


Рис. 3. Схематичное расположение термопар в конденсационной части установки

Методика определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации фреонов на горизонтальных поверхностях. Коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности определялся по известной зависимости:

$$\alpha_{\text{общ}} = \frac{q_{\text{общ}}}{\Delta t_{\text{общ}}},$$

где $q_{\text{общ}}$ – плотность теплового потока, воспринимаемая оребренной поверхностью; $\Delta t_{\text{общ}}$ – общий температурный напор оребренной поверхности.

Аналогичным образом определялись коэффициенты теплоотдачи для межреберной и гладкой поверхности:

Коэффициент теплоотдачи по ребру:

$$\alpha_p = \frac{q_p}{\Delta t_p},$$

где q_p – плотность теплового потока, воспринимаемая поверхностью ребер; Δt_p – температурный напор по ребру образца исследуемой поверхности теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи межреберной поверхности:

$$\alpha_{\text{мп}} = \frac{q_{\text{мп}}}{\Delta t_{\text{мп}}},$$

где $q_{\text{мп}}$ – плотность теплового потока, воспринимаемая межреберной поверхностью;
 $\Delta t_{\text{мп}}$ – температурный напор по межреберному пространству образца.

Коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности:

$$\alpha_{\text{гл}} = \frac{q_{\text{гл}}}{\Delta t_{\text{гл}}},$$

где $q_{\text{гл}}$ – плотность теплового потока, воспринимаемая гладкой поверхностью;
 $\Delta t_{\text{гл}}$ – температурный напор для гладкой поверхности образца.

Температурный напор по ребру образца исследуемой поверхности теплообмена:

$$\Delta t_{\text{р}} = t_{\text{нас}} - \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{6},$$

где $t_{\text{нас}}$ – температура насыщения фреона при данном давлении; $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ – температуры в соответствующих рис. 3 точках расположения термопар.

Температура насыщения:

$$t_{\text{н}} = t_7,$$

где t_7 – температура насыщения паров фреона в камере конденсации (рис. 3).

Температурный напор по межреберному пространству образца и для гладкой поверхности будет определяться следующим образом:

$$\Delta t_{\text{гл}} = \Delta t_{\text{мп}} = t_{\text{н}} - \frac{t_2 + t_5}{2}.$$

Общий температурный напор оребренной поверхности:

$$\Delta t_{\text{общ}} = t_{\text{н}} - \frac{\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{6} + \frac{t_2 + t_5}{2}}{2}.$$

Площадь несущей (основной гладкой) поверхности:

$$F_{\text{нес}} = F_{\text{гл}} = \pi d_2 l_2,$$

где d_2, l_2 – габаритные размеры образца (рис. 2).

Площадь оребренной поверхности:

$$F_{\text{р}} = \left[\left[\sqrt{\left(\frac{h_2 - h_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_3}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{h_2}{2} \right)^2} \right)^2} \right] l_1 \cdot 2 + h_1 l_1 \right] N_{\text{р}},$$

где $N_{\text{р}}$ – количество ребер на образце.

Площадь основания оребренной поверхности:

$$F_{\text{ор}} = \frac{N_p \cdot 2 \arcsin\left(\frac{h_2/2}{d_2/2}\right) \pi d_2 l_1}{360}.$$

Площадь межреберной поверхности:

$$F_{\text{мр}} = F_{\text{нес}} - F_{\text{ор}}.$$

Общая площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{мр}} + F_{\text{ор}}.$$

Тепловой поток, воспринимаемый межреберной поверхностью:

$$Q_{\text{мр}} = \frac{Q_{\text{общ}} F_{\text{мр}}}{F_{\text{нес}}},$$

где $Q_{\text{общ}}$ – тепловой поток, воспринимаемый оребренной поверхностью (экспериментальные данные).

Тепловой поток, воспринимаемый поверхностью ребер:

$$Q_p = \frac{Q_{\text{общ}} F_{\text{ор}}}{F_{\text{нес}}}.$$

Плотность теплового потока, воспринимаемая оребренной поверхностью:

$$q_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{F_{\text{общ}}}.$$

Плотность теплового потока, воспринимаемая межреберной поверхностью:

$$q_{\text{мр}} = \frac{Q_{\text{мр}}}{F_{\text{мр}}}.$$

Плотность теплового потока, воспринимаемая поверхностью ребер:

$$q_p = \frac{Q_p}{F_p}.$$

Плотность теплового потока, воспринимаемая несущей и гладкой поверхностью:

$$q_{\text{нес}} = q_{\text{гл}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{F_{\text{нес}}}.$$

Результаты экспериментального исследования конденсации маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях. На основании полученных результатов были построены зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурного напора для маслофреоновых смесей (R404A + масло) при различных концентрациях масла в смеси (0, 5 и 10 %).

Полученные результаты (рис. 4–7) свидетельствуют о влиянии концентрации масла на коэффициент теплоотдачи от температурного напора. Для маслофреоновых смесей наибольшее значение коэффициента теплоотдачи наблюдается при меньших значениях температурного напора, чем для чистого фреона R404A. Небольшие концентрации масла (5 %) в маслофреоновой смеси приводят к увеличению коэффициента теплоотдачи на ребре, и как следствие, общего коэффициента теплоотдачи. Дальнейшее увеличение концентрации масла (до 10 %) приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на ребре и на общей поверхности, соответственно.

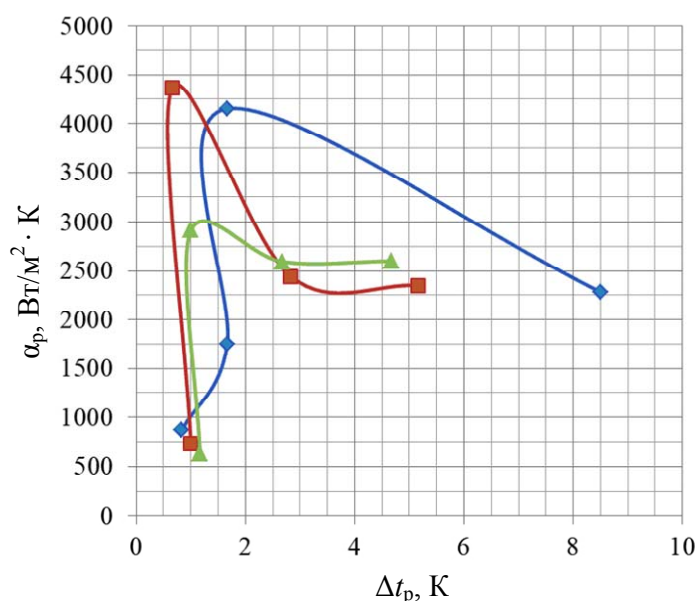


Рис. 4. Зависимости коэффициентов теплоотдачи по ребру от температурного напора по ребру для R404A и его маслофреоновых смесей:

— масла 0 %; — масла 5 %; — масла 10 %

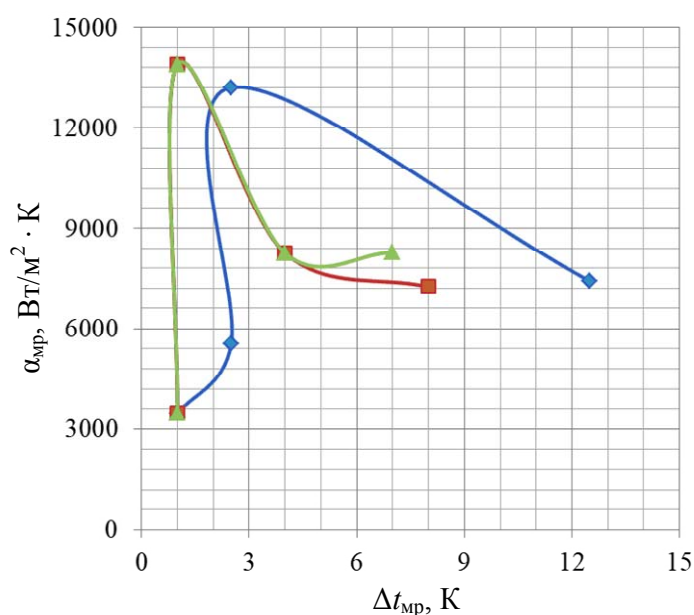


Рис. 5. Зависимости коэффициентов теплоотдачи межреберной поверхности от температурного напора на межреберной поверхности для R404A и его маслофреоновых смесей:

— масла 0 %; — масла 5 %; — масла 10 %

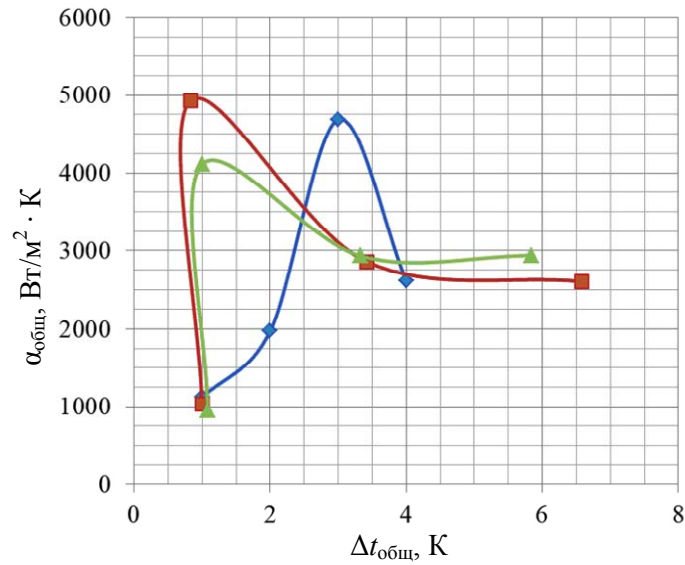


Рис. 6. Зависимости коэффициентов теплоотдачи общей поверхности от температурного напора общей поверхности для R404A и его маслофреоновых смесей:

— масла 0 %; — масла 5 %; — масла 10 %

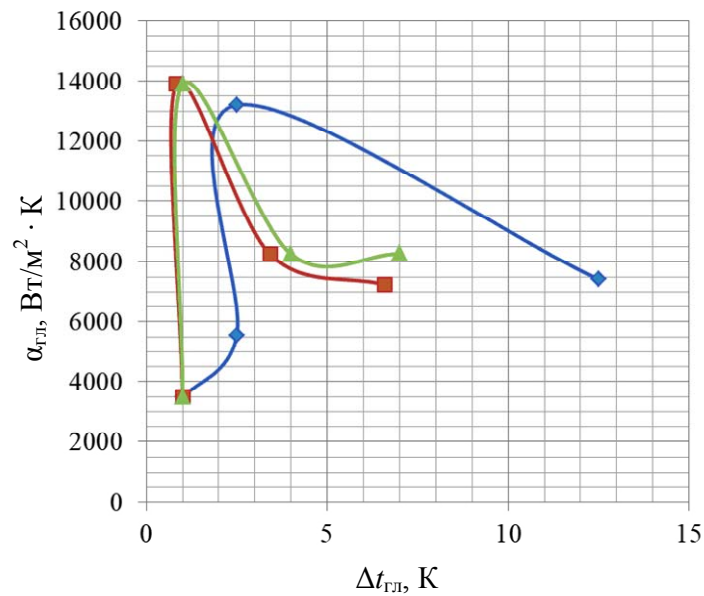


Рис. 7. Зависимости коэффициентов теплоотдачи гладкой поверхности от температурного напора для R404A и его маслофреоновых смесей:

— масла 0 %; — масла 5 %; — масла 10 %

Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- разработана методика проведения экспериментального исследования конденсации фреонов и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях;

- разработана методика определения коэффициентов теплопередачи при конденсации фреонов и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых горизонтальных поверхностях;

– на основании проведенных исследований и анализа получены значения коэффициентов теплоотдачи от температурного напора для маслофреоновых смесей (R404A + масло) с концентрацией масла 0, 5 и 10 % в жидкой фазе. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии концентрации масла на коэффициент теплоотдачи при конденсации паров маслофреоновых смесей.

Литература

1. Овсянник, А. В. Теплообмен и моделирование при кипении на теплоотдающих поверхностях / А. В. Овсянник. – LAMBERT : Academic Publishing, 2018. – 348 с.
2. Аршуков, А. И. Теплообмен при кипении озонобезопасных фреонов и их маслофреоновых смесей при повышенных тепловых нагрузках / А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук // Беларусь в современном мире : материалы XIII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 21–22 мая 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 232–234.
3. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении маслофреоновых смесей / А. В. Овсянник, П. А. Ковальчук, А. И. Аршуков // Современные проблемы теплофизики и энергетики : материалы III Междунар. конф., Москва, 19–23 окт. 2020 г. / Моск. энергет. ин-т. – М. : МЭИ, 2020. – С. 211–213.

References

1. Ovsyannik A. V. Heat transfer and simulation during boiling on heat-emitting surfaces. LAMBERT Academic Publ., 2018. 348 p. (in Russian).
2. Arshukov A. I., Kovalchuk P. A. Heat exchange during boiling of ozone-safe freons and their oil-freon mixtures at elevated thermal loads. Belarus' v sovremennom mire: materialy XIII Mezhdunar. nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh, Gomel', 21–22 maja 2020 g. [Belarus in the Modern world : materials of the XIII International Scientific Conference of Students, undergraduates, postgraduates and young scientists, Gomel, May 21–22, 2020]. Gomel, 2020, pp. 232–234 (in Russian).
3. Ovsjannik A. V., Koval'chuk P. A., Arshukov A. I. Heat exchange during boiling of oil-freon mixtures. Sovremennye problemy teplofiziki i jenergetiki: materialy III Mezhdunar. konf., Moskva, 19–23 okt. 2020 g. [Modern problems of thermophysics and energy: materials of the III International Conference, Moscow, October 19–23, 2020]. Moscow, 2020, pp. 211–213 (in Russian).

Поступила 07.09.2023 г.