

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79

УДК 621.311

Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях

А. В. Овсянник¹⁾, Е. Н. Макеева¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при пузырьковом кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на трубках с капиллярно-пористым покрытием. Исследования проводились на экспериментальной установке в условиях большого объема при давлениях насыщения $p_n = 0,9–1,4$ МПа и плотности теплового потока $q = 5–35$ кВт/м². Впервые получено критериальное уравнение для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении озонобезопасных хладагентов на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием. Опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя: давлений ($p_n = 0,9–1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5–35$ кВт/м²). Соотношение позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи с погрешностью $\pm 20\%$. Предложенная зависимость может быть использована в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа. Коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием в четыре раза выше, чем на гладкой, и в 1,5 раза выше, чем на оребренной поверхности, что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Кипение на капиллярно-пористых покрытиях приводит к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными.

Ключевые слова: теплообмен при кипении, парообразование, озонобезопасный хладагент, интенсивность теплообмена, коэффициент теплоотдачи, капиллярно-пористое покрытие, испаритель, теплообменный аппарат, холодильная установка, эмпирическая зависимость

Для цитирования: Овсянник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-20-36
Ovsyannik@tut.by

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Gomel State Technical University
named after P. O. Sukhoi,
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
Ovsyannik@tut.by

Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings

A. V. Ovsyannik¹⁾, E. N. Makeeva¹⁾

¹⁾Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The results of experimental research of heat exchange under the nucleate boiling of refrigerants R404a, R407c and R410a on the tubes with capillary-porous coating are presented. Experimental studies were carried out with the aid of an experimental installation in conditions of a large volume at pressures of saturation $p_{\text{н}} = 0.9\text{--}1.4$ MPa and densities of the heat flux $q = 5\text{--}35$ kW/m². For the first time the criterion equation for the calculation of the intensity of heat transfer during evaporation of ozone safe refrigerants on surfaces with high thermal conductivity sintered capillary-porous coating was obtained. Experimental data are summarized satisfactorily in a wide range of parameters of the porous layer, i.e. the pressure ($p_{\text{н}} = 0.9\text{--}1.4$ MPa) and heat loads ($q = 5\text{--}35$ kW/m²). The ratio makes us possible to calculate the heat transfer coefficients within $\pm 20\%$. The dependence can be used in engineering calculations of the characteristics of the heat exchangers of the evaporative type. The coefficient of heat transfer during boiling of refrigerants on the investigated surfaces with the sintered capillary-porous coating, 4 times higher than on a smooth one and 1.5 times higher than on the finned surface, that allows us to come to a conclusion about the advantage of porous coatings. Boiling in capillary-porous coating leads to a decrease in weight and size of the installations due to the heat exchange intensification and the size of the tubes smaller as compared to the size of the finned ones.

Keywords: boiling heat exchange, steam generation, ozone-friendly refrigerant, heat exchange rate, heat transfer coefficient, capillary-porous coating, evaporator, heat exchanger, refrigeration unit, empirical relationship

For citation: Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. (2018) Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79 (in Russian)

Введение

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена при кипении является применение пористых металлических покрытий. Пористая структура образуется в результате покрытия поверхности трубы тонкими металлическими сетками либо нанесения на нее металлического порошка определенной зернистости. При этом образуется пористый слой с разветвленной системой сообщающихся между собой капиллярных каналов, через которые происходят эвакуация пара и подпитка пористой структуры жидкостью, подтекающей сюда под действием сил поверхностного натяжения. Кипение происходит как внутри пористого покрытия, так и на его поверхности. Высокая интенсивность теплообмена свидетельствует о том, что пористая структура создает весьма благоприятные условия для зарождения и роста паровых пузырей. Например, авторы [1] указывают, что при кипении *n*-бутана ($p = 1,27 \cdot 10^5$ Па) на гладкой трубе образование паровых пузырей по всей ее поверхности наблюдалось только при $q = 35$ кВт/м², а на трубе с пористым покрытием вся ее поверх-

ность была занята паровыми пузырями уже при $q = 1,5 \text{ кВт/м}^2$. Эти и многие другие опыты показали, что устойчивое развитое кипение на поверхностях с пористыми покрытиями устанавливается при весьма незначительных температурных напорах (перегревах жидкости). Основной причиной этого является то, что в данном случае поверхности раздела фаз возникают внутри пористого слоя. При выбросе паровой фазы из пористой структуры в последней всегда остаются паровые включения, в которые испаряется тонкая пленка жидкости, обволакивающая стенки капиллярных каналов [1]. Испарение микропленки происходит по всей поверхности капиллярного канала, высота которого равна толщине пористого покрытия. Таким образом, элементы пористой структуры сами являются центрами зарождения паровой фазы. Так как диаметр капиллярных каналов больше критического диаметра обычного центра парообразования, испарение пленки в паровые включения или с поверхности капилляра требует значительно меньшего перегрева жидкости. Не менее значимо и то, что в пористой структуре перегрев поступающей в капилляры жидкости происходит в условиях весьма высокой интенсивности теплообмена. В условиях сильно развитой поверхности пористого слоя только за счет подогрева жидкости можно отводить от стенки весьма большие тепловые потоки. Снижение необходимого перегрева, а также интенсивный подогрев жидкости существенно уменьшают время «молчания» центров парообразования, что также способствует интенсификации теплообмена на трубах с пористыми структурами [2].

Анализируемая капиллярно-пористая высокотеплопроводная поверхность может рассматриваться как близкая к идеальной при условиях (рис. 1), когда:

1) спеченную высокотеплопроводную капиллярно-пористую структуру необходимо рассматривать как поверхность, образованную шипами, состоящими из частиц одинакового размера;

2) темп активации новых пузырьков пара должен быть пропорциональным изменению плотности теплового потока, чтобы исключить дополнительный перегрев стенки;

3) подводимая к теплоотдающей поверхности теплота расходуется на образование новых активных центров, а не на интенсификацию теплоотдачи за счет уже существующих. Причем интенсивность образования новых центров парообразования должна быть пропорциональна изменению тепловой нагрузки;

4) независимость изменения температуры от плотности теплового потока должна иметь место при небольших значениях q (для второго участка), так как в противном случае интенсивное образование новых центров парообразования при увеличении q приведет к значительному возрастанию количества паровой фазы и, в конечном итоге, к запариванию поверхности теплообмена и резкому падению интенсивности теплоотдачи.

Покрытия из пористых структур широко используются в элементах систем охлаждения радиоэлектронной, космической аппаратуры, энергетических установок, в качестве фитилей в различных типах тепловых труб.

В связи с их широким применением актуально изучение характера влияния тех или иных параметров на процессы кипения на пористых покрытиях с целью дальнейшего прогнозирования характеристик устройств, составляющими частями которых являются поверхности с пористым покрытием [3, 4].

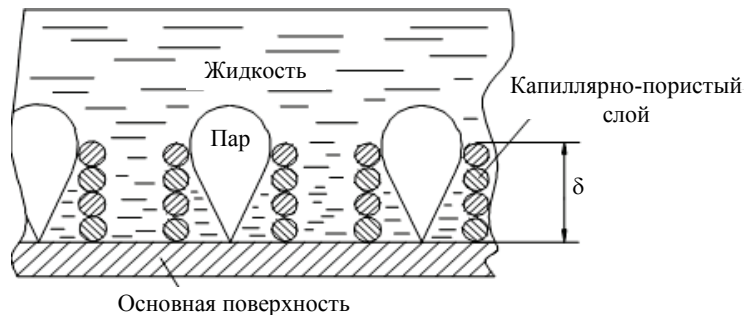


Рис. 1. Схема идеализированной капиллярно-пористой поверхности

Fig. 1. Diagram of an idealized capillary-porous surface

Известен ряд экспериментальных работ, в которых изучалось влияние поверхностных эффектов на кипение, однако результаты их недостаточны для построения обоснованных обобщений, а многие выводы противоречивы.

Цель данной работы – экспериментальное исследование процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях; установление обобщенных зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи и влияния на них различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в аппаратах холодильных и теплонасосных установок.

Анализ экспериментальных исследований

В настоящей работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a, R410a на трубках с капиллярно-пористым покрытием. Исследования проводились на экспериментальной установке в условиях большого объема при давлениях насыщения $p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа и плотности теплового потока $q = 5\text{--}35$ кВт/м² на экспериментальном стенде, описанном в [5].

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы с пористой поверхностью, представляющие собой горизонтальные медные трубы $\varnothing 26 \times 2$ мм, на наружную поверхность которых напеклась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н (рис. 2). Изготовление капиллярно-пористой структуры осуществлялось методом спекания свободной засыпки медного порошка в среде аргона в течение 1 ч при температуре от 1030 до 1050 °С. Для формования пористой структуры использовали оснастку из двух втулок – наружной из коррозионной стали

и медной втулки образца. Спексаемый порошок засыпали в свободное пространство между втулками. Втулки устанавливали на подложку из коррозионно-стойкой стали. Для предотвращения диффузии меди и припекания медного порошка поверхность наружной втулки предварительно подвергалась термообработке на воздухе в течение 3 ч при температуре 700 °С, в результате чего на ней образовывалась защитная окисная пленка. С целью получения образцов с разной толщиной капиллярно-пористой структуры применяли наружные втулки с разным внутренним диаметром. В процессе спекания медного порошка происходили его центральная усадка и припекание к медной втулке. Для обеспечения надежного припекания порошка предварительно производилась активация наружной поверхности медной втулки посредством пескоструйной обработки. Благодаря усадке после спекания и охлаждения до комнатной температуры медная втулка с напеченным слоем капиллярно-пористой структуры свободно извлекалась из наружной втулки [6].

Для всех исследованных спеченных капиллярно-пористых структур из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н, изготовленных методом свободной засыпки, открытая пористость составляла 50–55 %. Втулка с нанесенным на нее покрытием плотно надевалась на гладкий образец. Для исключения попадания хладагента незначительный зазор между гладким образцом и медной втулкой заполнялся термопастой.

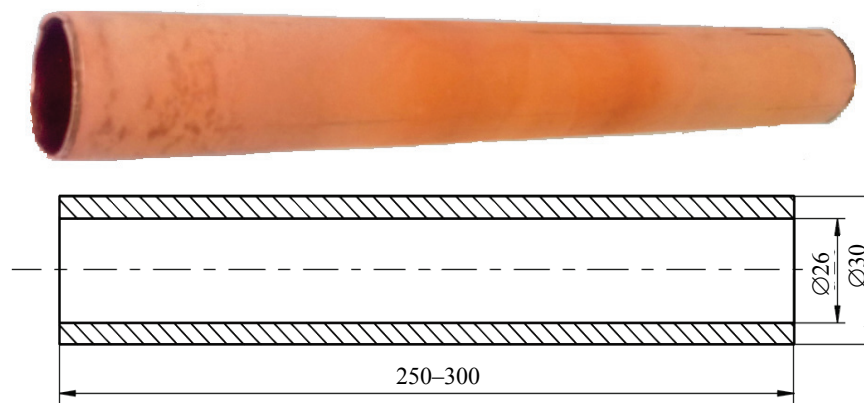


Рис. 2. Медный образец с пористым покрытием

Fig. 2. A copper sample with porous coating

Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1.

Визуальные наблюдения за процессом кипения показали наличие устойчивого пузырькового кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в области малых тепловых нагрузок, при которых для ребристых и особенно гладких труб характерен режим свободной конвекции. При этом число стабильно действующих центров парообразования существенно выше, а отрывные размеры пузырей меньше, чем на гладких поверхностях (рис. 3).

Таблица 1

Параметры пористого покрытия
The parameters of the porous coating

№ образца	Толщина слоя пористого покрытия δ , мм	Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$, мкм	Пористость, %
1	0,5	50	50–55
2	100	100	
3	0,7	50	
4		100	
5	1,0	50	
6		100	



Рис. 3. Процесс развитого пузырькового кипения на поверхности образца с капиллярно-пористым покрытием

Fig. 3. The process of the developed nucleate boiling on the surface of the sample with capillary-porous coating

Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием с различной толщиной и средним диаметром частиц представлены на рис. 4.

Более значительная интенсивность теплоотдачи наблюдалась при толщине слоя пористого покрытия 1 мм и диаметре частиц 100 мкм (рис. 4а).

Увеличение давления приводит к значительному возрастанию интенсивности теплоотдачи, однако выбор его оптимального значения будет определяться множеством факторов, в частности обеспечением безопасности, надежности установки, ее массогабаритными показателями и энергоемкостью. При тепловых потоках более 30 кВт/м^2 влияние давления на коэффициент теплоотдачи менее заметно. Это подтверждает график, изображенный на рис. 4б.

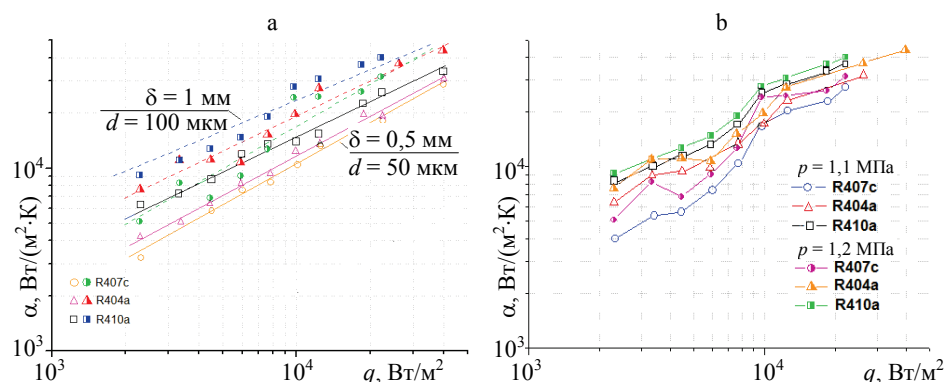


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием:
а – при различной толщине и среднем диаметре частиц;
б – при различных давлениях насыщения

Fig. 4. The experimental dependence $\alpha = f(q)$ when R407c refrigerants, R404a and R410a are boiling on the surface of the sintered capillary-porous coating:
а – in case of various thickness and average particle diameter;
б – in case of different saturation pressures

Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на различных типах поверхностей приведено на рис. 5а. Использованы данные при кипении на оребренной поверхности с трапециевидным профилем ребра и пористой поверхности толщиной 1 мм и средним диаметром частиц 100 мкм.

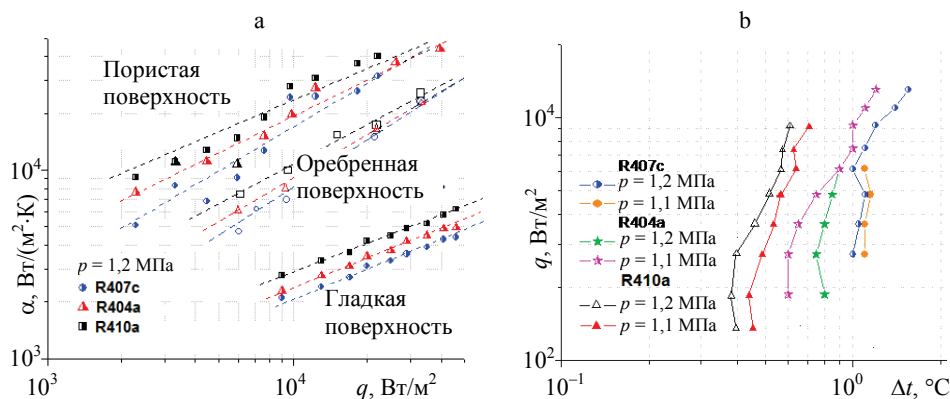


Рис. 5. Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a:
а – экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ для различных типов поверхности;
б – экспериментальные зависимости $q = f(\Delta t)$ на пористой поверхности

Fig. 5. Comparison of heat exchange intensity in boiling of freons R407c, R404a and R410a:
а – experimental dependencies $\alpha = f(q)$ for different surface types;
б – experimental dependencies $q = f(\Delta t)$ on a porous surface

Как видно из рис. 5а, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием значительно выше, чем на гладкой (в четыре раза) и оребренной (в 1,5 раза), что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Применение испарительных трубок с нанесенным капиллярно-

пористым покрытием приведет к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными. Интенсификация процесса теплообмена при кипении фреонов наблюдалась во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

На рис. 5b показана зависимость подводимой тепловой нагрузки от температурного напора. Из графика видно, что при повышении давления температурные напоры снижаются, однако рост Δt с увеличением нагрузки происходит более интенсивно, что может привести к возникновению кризиса теплообмена при более низких тепловых потоках [7, 8]. Наименьшие температурные напоры наблюдались при кипении хладагента R410a.

Аналитическое решение задачи о теплообмене при кипении представляется весьма проблематичным из-за большого количества факторов, влияющих на процесс, а также сложной взаимосвязи между ними. Трудным оказывается также получение приближенной эмпирической зависимости, имеющей ясный физический смысл. Приведенные в литературе расчетные соотношения для определения интенсивности теплообмена на спеченных покрытиях оказались непригодными для обобщения опытных данных настоящей работы. Поэтому при проведении анализа и выводе обобщающего уравнения учитывались бесспорно установленные экспериментальные факты и рассматривались наиболее существенные для данного процесса связи [9, 10].

При обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении хладагентов на медных спеченных капиллярно-пористых структурах в условиях большого объема была получена следующая критериальная зависимость:

$$Nu = 45 K_{\text{кс}}^{0,7} K^{0,9} Pr^{0,6}, \quad (1)$$

или в развернутом виде:

$$\frac{\alpha \bar{d}_0}{\lambda_{\text{ж}}} = 45 \cdot \left(\frac{\delta_{\text{кс}}}{\bar{d}_0} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{q}{r \rho_{\text{п}} \omega''} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{v}{a} \right)^{0,6}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); \bar{d}_0 – средний гидравлический размер пор, м; $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К); $\delta_{\text{кс}}$ – толщина капиллярной структуры, м; q – плотность теплового потока, Вт/м²; ω'' – скорость роста паровых пузырей, м/с; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Физические свойства жидких и парообразных хладагентов взяты на линии насыщения.

Обобщающая кривая экспериментальных данных по теплообмену при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхностях с пористым покрытием в соответствии с соотношением (2) представлена на рис. 6.

График показывает, что опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя – давлений ($p_{\text{н}} = 0,9\text{--}1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5\text{--}35$ кВт/м²). Соотношение (2)

позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи α с погрешностью $\pm 20\%$. Предложенная зависимость может использоваться в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа.

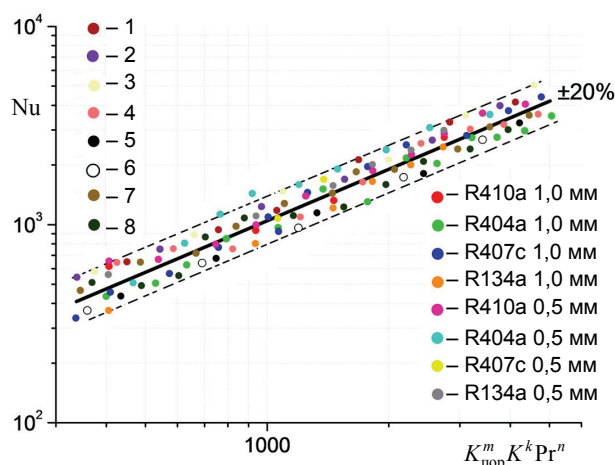


Рис. 6. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхности со спеченной пористой структурой при давлении $p_n = 1,2$ МПа с различной толщиной покрытия с помощью зависимости (2); 1, 2, 3, 4 – при давлении $p_n = 1,3$ МПа; 5, 6, 7, 8 – при давлении $p_n = 1,1$ МПа

Fig. 6. Generalization of experimental data on heat transfer during boiling of refrigerants R404a, R407c and R410a on the surface of the sintered porous structure at a pressure of $p_n = 1.2$ MPa with different coating thickness with the use of the dependency (2); 1, 2, 3, 4 – at a pressure of $p_n = 1.3$ MPa; 5, 6, 7, 8 – at a pressure of $p_n = 1.1$ MPa

ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием при следующих режимных параметрах: давлении насыщения $p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа, температуре насыщения $t_n = (12,9\text{--}28,5)$ °С, плотности теплового потока $q = 5\text{--}35$ кВт/м².

2. Получено критериальное уравнение для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении озонобезопасных хладагентов на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием. Опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя – давлений ($p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5\text{--}35$ кВт/м²). Соотношение позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи α с погрешностью $\pm 20\%$. Предложенная зависимость может быть использована в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа.

3. Коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием в четыре раза выше, чем на гладкой, и в 1,5 раза выше, чем на оребренной поверхности, что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Кипение на капиллярно-пористых покрытиях приводит к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кичатов, Б. В. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена при взаимодействии двухфазных потоков с пористой средой / Б. В. Кичатов. М., 2000. 235 с.
2. Смирнов, Г. Ф. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах / Г. Ф. Смирнов, А. Д. Цой. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 439 с.
3. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2004. 371 с.
4. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2012. 284 с.
5. Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов: отчет о НИР (заключит.) / ГГТУ имени П. О. Сухого; рук. темы А. В. Овсянник. Гомель, 2015. 101 с. № ГР 20141921.
6. Интенсификация теплообмена при фазовых переходах в пористых покрытиях источников тепловыделения: отчет о НИР (заключит.) / АНК ИТМО НАНБ; рук. темы Л. Л. Васильев. Минск, 2000. 73 с. № ГР 19981975.
7. Шаповалов, А. В. Теплоотдача при парообразовании в пористой структуре в условиях большого объема и капиллярного транспорта жидкости к зонам генерации пара / А. В. Шаповалов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. 2005. № 2. С. 15–22.
8. Кичатов, Б. В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями / Б. В. Кичатов, В. М. Поляев // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 72–76.
9. Обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении пропана на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях / Л. Л. Васильев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. 2001. № 2. С. 3–13.
10. Новиков, М. Н. Интенсификация теплообмена при кипении пропана на пористых покрытиях / М. Н. Новиков. Минск, 2001. 180 с.

Поступила 11.04.2017 Подписана в печать 20.06.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Kichatov B. V. (2000) *Modeling of Processes of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Interaction of Two-Phase Flows with a Porous Medium*. Moscow. 235 (in Russian).
2. Smirnov G. F., Tsoi A. D. (1999) *The Heat Transfer During Evaporation in Capillaries and Capillary-Porous Structures*. Moscow, MPEI Publ. 439 (in Russian).
3. Ovsyannik A. V. (2004) *The Boiling Heat Transfer on the Developed Surfaces*. Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 371 (in Russian).
4. Ovsyannik A. V. (2012) *Modeling of Heat Transfer in Boiling Liquids*. Gomel, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 284 (in Russian).
5. Ovsyannik A. V. (head) (2015) *The Study of Heat and Mass Transfer at Phase Transformations of One-Component and Mixture Ozone-Safe Refrigerants: Research Report (Final)*. No SR 20141921. Gomel, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 101 (in Russian).
6. Vasil'ev L. L. (head) (2000) *Intensification of Heat Transfer at Phase Transitions in Porous Coatings of Heat Sources: Research Report (Final)*. No SR 19981975. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 73 (in Russian).
7. Shapovalov A. V. (2005) Heat Transfer in Evaporation in a Porous Structure with a Large Volume and Capillary Fluid Transport to Areas of Steam Generation. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi], (2), 15–22 (in Russian).
8. Kichatov B. V., Polyayev V. M. (1999) The Boiling of Liquid on Surfaces with Porous Coatings. *Teplotenergetika = Thermal Engineering*, (3), 72–76 (in Russian).
9. Vasil'ev L. L., Zhuravlev A. S., Ovsyannik A. V., Novikov M. N. (2001) Generalization of Experimental Data on Boiling Heat Transfer of Propane on Copper Sintered Capillary-Porous Coating. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi], (2), 3–13 (in Russian).
10. Novikov M. N. (2001) *Intensification of Heat Transfer at Propane Boiling on a Porous Coatings*. Minsk. 180 (in Russian).

Received: 11 April 2017

Accepted: 20 June 2017

Published online: 29 January 2018