

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ НА ГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

**А. В. ОВСЯННИК, А. В. ШАПОВАЛОВ, Е. Н. ВОЛКОВА,
В. Г. ЯКИМЧЕНКО, А. В. РОДИН**

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

Введение

Процессы теплообмена при кипении жидкостей являются интенсивными и сопровождаются переносом больших количеств теплоты и массы. Такие процессы находят широкое практическое применение в затопленных кожухотрубных испарителях. Вес испарителей составляет 35–40 % от общего веса холодильной машины, а потери энергии из-за термодинамической необратимости процесса теплообмена соизмеримы с энергетическими потерями компрессора. Поэтому задачи интенсификации и обоснованного проектирования испарителей имеют первостепенное практическое значение.

В литературных источниках материал по исследованию теплообмена при парообразовании озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях практически отсутствует, а имеющиеся данные других авторов могут только частично использоваться для проектирования испарителей, так как получены в пределах узких интервалов изменения подводимой к поверхности тепловой нагрузки и давлений насыщения. Так, в [5] представлены данные по кипению хладагента R134a в диапазоне тепловых нагрузок 7–50 кВт/м² и только при температурах насыщения 4,44 и 26,7 °С.

Таким образом, целью работы является:

- определение интенсивности теплообмена при парообразовании озонобезопасных хладагентов R134a, R404a и R407c на гладкой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме в результате проведенного экспериментального исследования процесса;
- получение эмпирического соотношения для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов R134a, R404a и R407c на гладкой поверхности.

Описание экспериментальной установки и методики проведения исследования

На рис. 1 представлена установка, предназначенная для исследования процесса теплообмена при парообразовании на гладких и развитых поверхностях. Схема установки показана на рис. 2.

Рабочая испарительная камера и водяной теплообменник-конденсатор представляют собой два сваренных между собой цилиндра, закрытых фланцами (рис. 3). Один из фланцев имеет стеклянный иллюминатор для подсветки фонарем 4. На втором фланце расположен разъем 6 для подвода термопар. Посреди камеры находится смотровое окно 7. На фланце водяного теплообменника-конденсатора 2 установлены два змеевика для охлаждения паров фреона. Для хранения фреона служит баллон 3. На рабочей камере установлен манометр 8. Вентили 11–16 служат для подачи в камеру углекислого газа, при проверке на герметичность и вывода паров фреона, при замене образца. На стойке 5 смонтированы электрические розетки 9: для подачи напряжения, подсветки, нагрева рабочего образца. Питающее напряжение подается че-

рез автоматический выключатель. Мощность, передаваемая рабочему образцу, регулируется лабораторным трансформатором.



Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования процесса теплообмена при парообразовании на гладких и развитых поверхностях

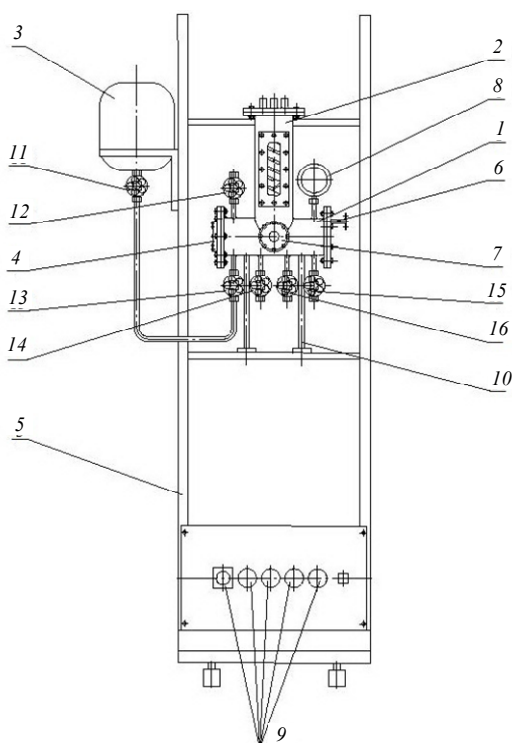


Рис. 2. Схема установки по исследованию процессов теплообмена при парообразовании на гладких и развитых поверхностях:

- 1 – рабочая испарительная камера; 2 – водяной теплообменник-конденсатор;
 3 – баллон с жидким фреоном; 4 – крышка под фонарь; 5 – стойка; 6 – вывод термопар;
 7 – окно для визуального наблюдения; 8 – манометр; 9 – розетки;
 10 – опора; 11–16 – вентили

Экспериментальный образец изготавливался из дюралюминия. Тепловой поток к образцам подводился электрическим нагревателем. На основной поверхности образцов фрезеровались канавки для установки термопар, которые потом зачеканивались вкладышами. Использовались медь-константановые термопары с толщиной проводников 0,2 мм. За температуру поверхности принималась средняя температура по результатам измерения четырех термопар. В качестве вторичного прибора использовался измеритель-регулятор «Сосна-002» класса точности 0,5 со шкалой 0 °С – 800 °С.

При обработке экспериментальных данных за температуру насыщения принималась температура, измеренная тремя термопарами, две из которых располагались в объеме фреона и одна в паровом пространстве. Показания термопар контролировались образцовым манометром. Условия насыщения в рабочей камере поддерживались регулированием расхода охлаждающей воды через теплообменник-конденсатор.



Рис. 3. Рабочая камера экспериментального стенда для исследования процессов теплообмена при парообразовании на гладких и развитых поверхностях

Экспериментальные исследования проводились при постепенном повышении тепловой нагрузки до достижения максимально возможной ее величины. После этого тепловой поток плавно уменьшался.

Нагреватель рабочего участка подключался к сети 220 В через стабилизатор напряжения С-05 и лабораторный автотрансформатор РНО-250. Для определения подводимой мощности использовались вольтметр Э533 и амперметр Д553. Мощность электронагревателя относили к полной наружной поверхности гладкого образца. Тепловой поток через поверхность образцов определялся без учета тепловых потерь.

Коэффициент теплоотдачи α рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{q}{t_{ст} - t_0}, \quad (1)$$

где q – теплового потока, отнесенный к единице площади поверхности гладкого образца, Вт/м²; $t_{ст}$ – средняя температура стенки образца, К; t_0 – температура насыщения, соответствующая давлению в испарительной камере, К.

Длительность выхода температуры поверхности нагрева на постоянный режим составляла от 15 до 60 мин. Начало кипения жидкости на поверхности нагрева определялось визуально в момент активации первых центров парообразования.

Тарировочный эксперимент

Для того чтобы удостовериться в надежности полученных опытных данных, на экспериментальной установке был выполнен контрольный опыт. Были построены графические зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении фреона R134a при температуре насыщения $t_n = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ на гладкой поверхности. Результаты тарировочного эксперимента приведены на рис. 4.

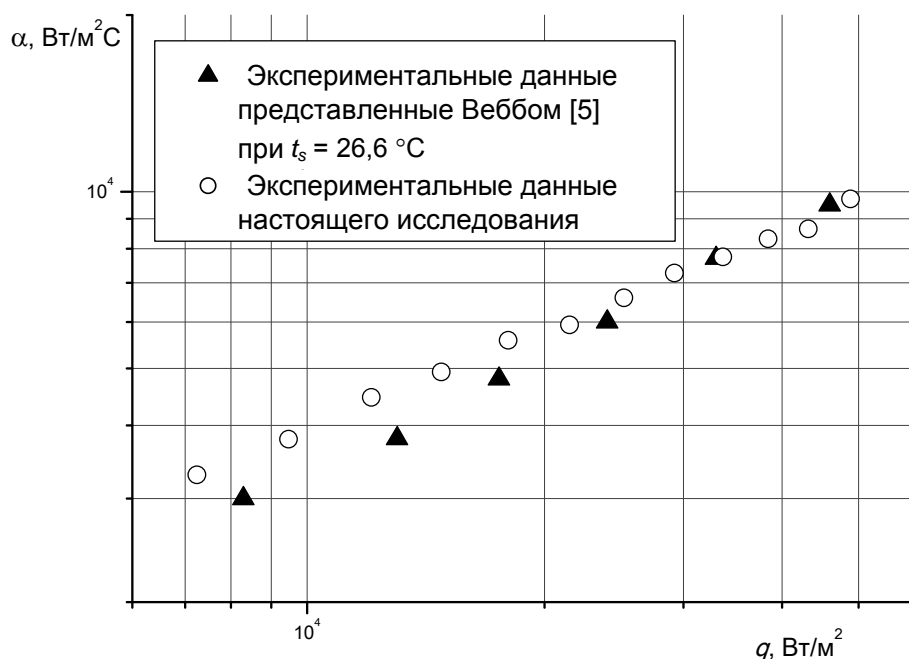


Рис. 4. Сравнение экспериментальной зависимости $\alpha = f(q)$ настоящего исследования с экспериментальной зависимостью, представленной Веббом [5] при температуре насыщения $26,6 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из графиков, опытные данные настоящего исследования удовлетворительно согласуются с результатами опытов, полученных Веббом на гладких горизонтальных трубах [5].

Расчет погрешности измерений

В работе выполнена оценка косвенного измерения коэффициента теплоотдачи, который определяется прямыми измерениями подводимой тепловой мощности и температурного напора.

Источниками систематических погрешностей в описываемых исследованиях могут являться невысокий класс точности измерительных приборов и неправильная их калибровка, дополнительных систематических – неточная градуировка термомпар и некачественная их установка (например, плохой контакт с поверхностью объекта температурного измерения), изменение климатических условий, при которых выполняются исследования. В данной работе использование аппаратуры высокого класса точности, градуировка термомпар после контроля их однородности и регулярные метрологические поверки приборов позволили обеспечить минимальный уровень систематических ошибок. В тех случаях, когда систематические ошибки, поро-

ждаемые известными причинами, устранены, вклад в значение полной погрешности прямого измерения определяется величиной случайной погрешности и приборной погрешности средств измерений, которые обусловлены независимыми причинами.

Сила тока I измерялась амперметром Д553 с основной погрешностью, не превышающей $\pm 0,2\%$ от конечного значения шкалы, а напряжение U вольтметром Э533 с основной погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$. При замерах указанных электрических величин использовались шкалы с диапазонами до 5 А и 300 В.

Общая относительная погрешность измерения физической величины складывается из ошибок, вносимых приборами, и случайных ошибок.

Ошибка температурных измерений обусловлена ошибками измерительного прибора. Все температуры измерялись многоканальным измерителем-регулятором «Сосна-002», имеющим предел допустимой приведенной погрешности измерения 0,5%. Диапазон измерения прибора от 0 до $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поскольку погрешность измерений находится в обратной зависимости с абсолютным значением измеряемой величины, систематическая ошибка определения температурного напора вычислялась для наименьших значений температуры стенки. Оценивалась также минимальная ошибка, которая возникает при измерении наибольших температур. Минимальные величины температуры поверхности теплообмена составляли $T_{\min} \sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ при низких тепловых нагрузках. Максимальные температуры составляли $T_{\max} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме развитого кипения.

Относительная ошибка определения коэффициента теплоотдачи:

$$k_{\alpha} = \sqrt{k_q^2 + k_{\Delta T}^2}. \quad (2)$$

$$k_{\alpha}^{\min} = \sqrt{0,0133^2 + 0,149^2} = 0,149;$$

$$k_{\alpha}^{\max} = \sqrt{0,0133^2 + 0,269^2} = 0,269.$$

Таким образом, максимальная погрешность в определении коэффициента теплоотдачи не превышала 30%. Наибольшая ошибка в определении коэффициента теплоотдачи вносится измерителем-регулятором «Сосна-002».

Результаты экспериментов

В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении хладагентов R134a, R404a и R407c на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме. Кипение в большом объеме применяется в промышленных испарителях большой производительности, так как в условиях направленного движения жидкости внутри труб могут возникнуть затруднения с отводом пара при интенсивном парообразовании и, как следствие, снижение теплоотдачи.

Эксперименты проводились при различных значениях плотности теплового потока и давлений насыщения.

На рис. 5 приведено сравнение характеристик теплообмена для трех исследуемых озонобезопасных хладагентов (R134a, R404a и R407c) на гладкой технически шероховатой поверхности в области развитого пузырькового кипения. Плотность теплового потока изменялась в пределах $3,5\text{--}50\text{ кВт/м}^2$, давление насыщения – в пределах $0,4\text{--}1,25\text{ МПа}$. Сопоставление производилось при близких друг к другу температурах насыщения жидкости, так как теплофизические свойства указанных хладагентов, в частности температура кипения, существенно различаются (R134a: $t_n = -26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$; R404a: $t_n = -46,7\text{ }^{\circ}\text{C}$; R407c: $t_n = -43,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $p = 101,3\text{ кПа}$).

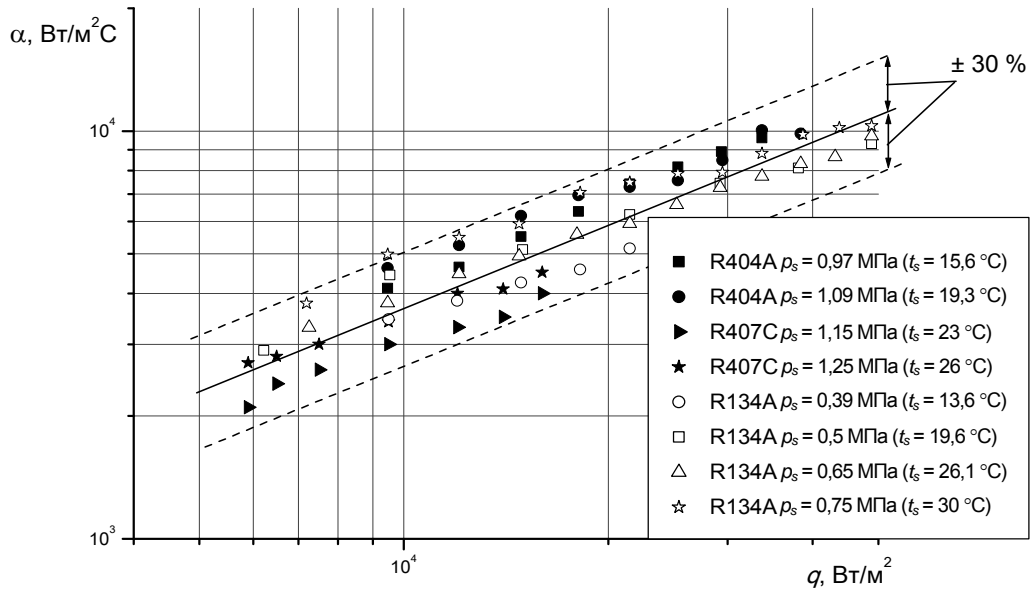


Рис. 5. Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ в области развитого пузырькового кипения для фреонов 134а, 404а и 407с

Из графика видно, что интенсивность теплоотдачи при кипении фреона R404a выше, чем при кипении R134a и R407c, что при использовании первого повлечет за собой снижение массогабаритных показателей испарителя. Однако при разработке оборудования необходимо учитывать тот факт, что при использовании R404a процесс будет проходить при повышенных давлениях по сравнению с R134a.

Анализ экспериментальных результатов

На основании опытных данных было установлено, что при повышении плотности теплового потока степень влияния давления насыщения снижается из-за увеличения величины перегрева, необходимого для вскипания жидкости и снижения темпа роста числа активных центров парообразования.

С увеличением давления также наблюдается интенсификация теплообмена. С повышением давления облегчаются условия зарождения паровых пузырей на теплоотдающей поверхности и растет турбулизация потока паровой фазы.

При понижении давления, наоборот, поверхность обедняется центрами парообразования, поэтому для зарождения на ней паровых пузырей данного радиуса требуется более высокий перегрев жидкости или более высокое значение удельного теплового потока. Кроме того, повышение интенсивности теплообмена с увеличением давления насыщения при кипении вызывается уменьшением отрывного диаметра парового пузыря и увеличением плотности центров парообразования.

Вопрос о закономерностях процесса и о расчетном определении интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей достаточно сложен. Точное решение этой задачи пока не получено. Трудным оказывается также получение приближенного решения, имеющего ясный физический смысл и удовлетворительно обобщающего опытные данные.

В результате обобщения полученных результатов при кипении хладагентов на гладких трубах получена общая формула для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = 5 p^{0,8} q^{0,53}, \tag{3}$$

где p – абсолютное давление, кгс/см²; q – тепловой поток, Вт/м².

Экспериментальные данные удовлетворительно описываются эмпирическим уравнением с погрешностью $\pm 30\%$.

Заключение

Установлено эмпирическое соотношение, позволяющее рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов R134a, R404a и R407c в диапазоне подводимых тепловых потоков 3,5–50 кВт/м² и давлений насыщения в пределах 0,4–1,25 МПа в условиях большого объема.

Полученное соотношение можно рекомендовать для инженерных расчетов интенсивности теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов в условиях большого объема на поверхностях кожухотрубчатых испарителей типа ИН, ИК, испарителей с паровым пространством с плавающей головкой ИП и с U-образными трубами ИУ. Данные типы испарителей применяются в современных промышленных холодильных машинах и теплонасосных установках большой мощности.

Литература

1. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
2. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2004. – 371 с.
3. Овсянник, А. В. Теплофизическое моделирование теплообмена при кипении на неизотермической (поперечно-ребренной) поверхности / А. В. Овсянник // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2004. – № 3. – С. 49–58.
4. Проблемы тепло- и массопереноса / под общ. ред. О. Г. Мартыненко. – Минск, 1991.
5. Webb, R. F. Nucleate pool boiling data for five refrigerants on plain integral-fin and enhanced tube geometries / R. F. Webb, C. Pais // Heat Mass Transfer. – 1992. – Vol. 35, N. 8. – P. 1893–1904.

Получено 28.11.2012 г.