

УДК 536.24

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА 134А НА ГЛАДКИХ
ТЕХНИЧЕСКИ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
С ОБОБЩЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ****А. В. ОВСЯННИК, Д. А. ДРОБЫШЕВСКИЙ, Д. А. ГУРИКОВ***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь***Введение**

С середины XVIII и до начала XX в. в качестве хладагентов для холодильных систем применяли различные вещества: воду, диэтиловый и метиловый эфиры, аммиак, диоксид углерода, сернистый ангидрид, метилхлорид и др. После выпуска в 1930 г. компанией «Кинетик Кемикалз Инк» (США) первых партий дихлордифторметана, относящегося к группе хлорфторуглеродов (ХФУ), и организации его промышленного производства в 1932 г. многие рабочие вещества, кроме аммиака, почти полностью исчезли с рынка хладагентов. В середине 30-х г. было налажено производство в промышленных масштабах хладагентов R11, R113 и R114. С 1935 г. был организован выпуск хладагента R22, относящегося к группе гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ). Для получения очень низких температур были разработаны хладагенты R13, R503 и R13B1 [1]. До начала 80-х г. ХФУ и ГХФУ заняли доминирующее положение в холодильной промышленности (бытовое, торговое и промышленное холодильное оборудование).

К 80-м г., когда специалисты ряда стран начали заниматься вопросами изучения влияния ХФУ и ГХФУ на окружающую среду, эти хладагенты стали предметом беспокойства в связи с возникшими глобальными проблемами: повышением парникового эффекта и возможным разрушением озонового слоя.

Парниковый эффект возникает вследствие того, что некоторые газы земной атмосферы задерживают инфракрасное излучение, которое испускает земная поверхность. И хотя концентрация всех вместе взятых ХФУ в атмосфере довольно мала, их эффективность по удержанию инфракрасного излучения весьма и весьма высока, в частности, вследствие их очень длительного периода жизни (60 лет для R11, 120 лет для R12 и 250 лет для RН5, который входит в состав R502).

Разрушение стратосферного озона связано с ультрафиолетовым излучением Солнца. Озоновый слой поглощает 99 % ультрафиолетового излучения Солнца, падающего на Землю, и выполняет роль защитного экрана для земной жизни. И хотя молекулы ХФУ тяжелее воздуха, и число их в стратосфере крайне мало (3–5 молекул ХФУ на 10 млрд молекул воздуха), одна молекула хлора, достигающая атмосферы, способна разрушить 10–100 тыс. молекул озона.

Для замены ХФУ с начала 90-х г. основными мировыми производителями химической продукции были разработаны и выпускаются озонобезопасные смеси группы ГФУ (R407С и др.) и однокомпонентные озонобезопасные хладагенты (R134а и др.).

Задачи и методы исследования

Целью работы было исследование теплообмена при кипении фреона 134а на гладких технически шероховатых поверхностях на установке, описанной в [2]. Были исследованы образцы длиной $l = 302$ мм и диаметром $d = 24$ мм. Экспери-

ментальные исследования теплообмена при кипении фреона 134а проводились в диапазоне тепловых потоков 8-63 кВт/м² и давлений насыщения $p_n = 0,5-0,8$ МПа ($T_n = 15,7-31,4$ °С).

Коэффициент теплоотдачи α рассчитывался по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{T_{ст} - T_n}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; $T_{ст}$ – средняя температура стенки образца, К; T_n – температура насыщения, соответствующая давлению в рабочей камере, К.

Плотность теплового потока вычислялась по отношению подводимой мощности к площади внешней поверхности трубы:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (2)$$

где Q – подводимая мощность, Вт; F – площадь внешней поверхности трубы, м².

Перепад температуры $\Delta T = T_{ст} - T_n$ между наружной поверхностью гладкой трубы и жидкостью в состоянии насыщения определялся по среднему значению четырех дифференциальных термпар с учетом падения температуры внутри стенки трубы. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи, определенная по методикам [3]–[5], не превышала 15 %.

Обработка экспериментальных данных

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости $q = f(\Delta T)$ при кипении фреона 134а на гладкой технически шероховатой поверхности. Данные зависимости показывают, что при кипении фреона 134а в условиях большого объема на гладких технически шероховатых поверхностях перегрев при развитом пузырьковом кипении уменьшается с возрастанием давления, что качественно согласуется с результатами большинства экспериментальных исследований по кипению жидкостей. Представленные на рис. 2 экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ показывают, что α непрерывно возрастает с увеличением давления. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением давления уменьшается величина радиуса элемента, который при данном значении ΔT может явиться центром зарождения паровой фазы. Следовательно, с увеличением давления облегчаются условия зарождения паровых пузырей на теплоотдающей поверхности. 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 плотности теплового потока.

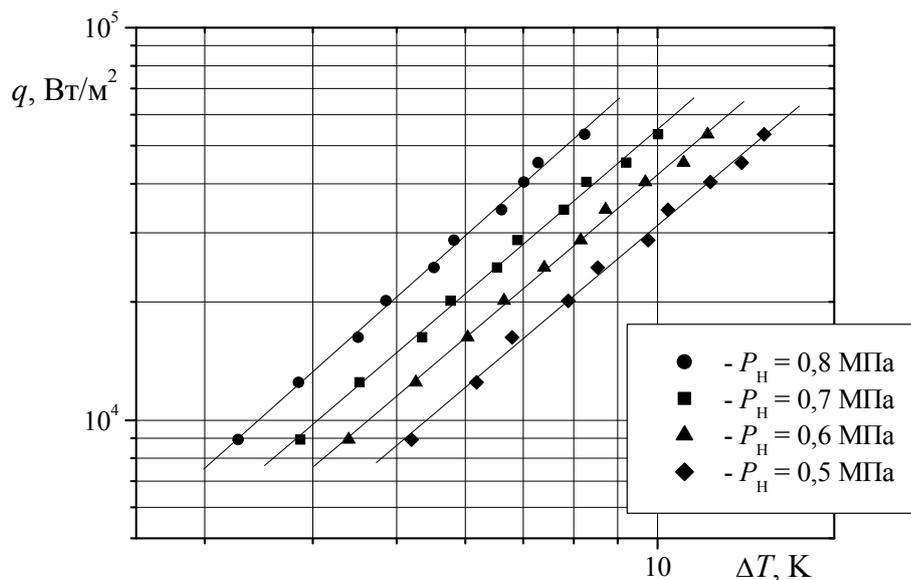


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $q = f(\Delta T)$ при кипении фреона 134а на гладкой технически шероховатой поверхности

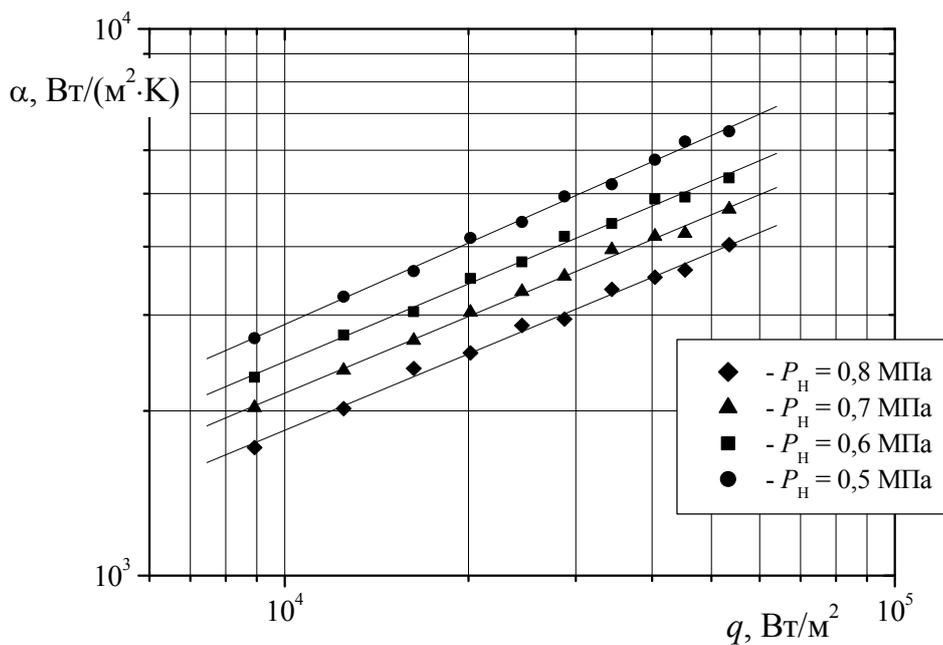


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреона 134а на гладкой технически шероховатой поверхности

Углы наклона кривых практически равны при различных значениях давления насыщения. Такой ход кривых кипения говорит о том, что с увеличением давления не происходит качественных изменений процесса теплообмена.

На рис. 3 представлена зависимость $\alpha = f(q)$ при кипении фреона 134а и фреона 12 на гладкой технически шероховатой поверхности в сопоставимых условиях. Как видно из рисунка, коэффициенты теплоотдачи при кипении фреона 12 [6] намного превосходят полученные экспериментально коэффициенты теплоотдачи при кипении фреона 134а. Это можно объяснить различием теплофизических свойств данных хладагентов. Таким образом, при расчете интенсивности тепло-

обмена при кипении фреона 134а нельзя использовать зависимости, полученные при кипении фреона 12.

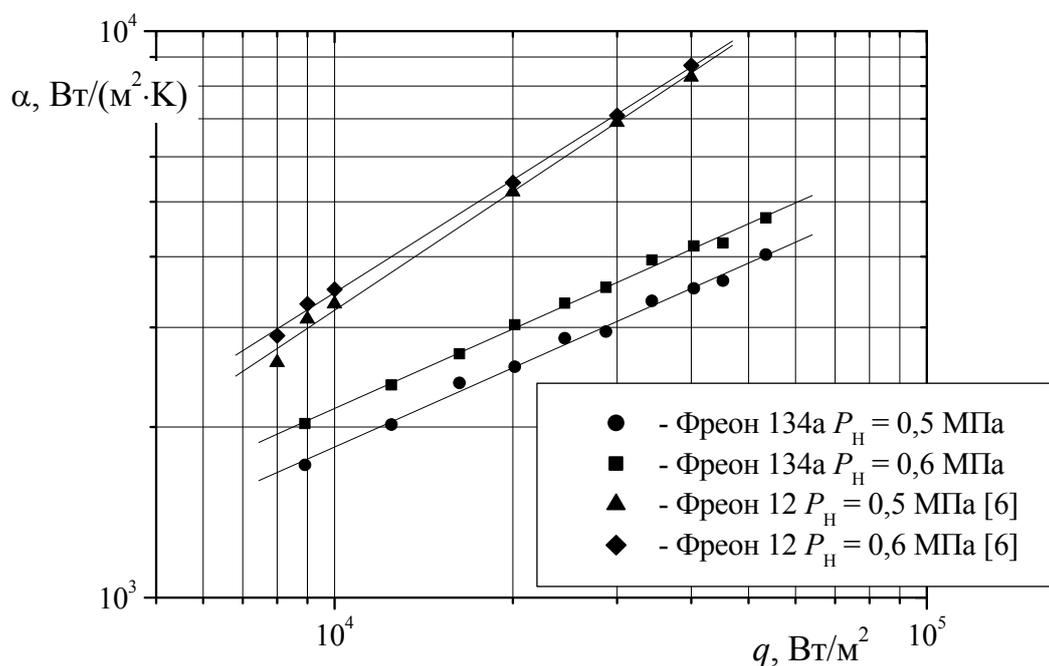


Рис. 3. Зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреона 134а и фреона 12 на гладкой технически шероховатой поверхности

Обобщение результатов

При анализе и решении задачи об интенсивности теплообмена при кипении жидкостей необходимо решить вопросы, касающиеся выбора независимых переменных, влияющих на теплообмен и установить степень их влияния. В целях упрощения задачи из всего многообразия условий, в которых может протекать процесс теплообмена при кипении, вполне допустимо выделить режим, в пределах которого устанавливаются характерные для него соотношения между параметрами, определяющими доминирующее влияние того или иного механизма переноса теплоты (или совместное их влияние) на интенсивность теплообмена.

Процесс теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении жидкостей можно рассматривать как теплоотдачу при кипении в условиях естественной конвекции, и в общем случае анализ системы уравнений процесса теплообмена при кипении в большом объеме приводит к связям между обобщенными переменными, в частности, в следующем виде [7]:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Ar}, K_t, K_p), \quad (3)$$

где Nu, Re, Pr, Ar – числа подобия Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Архимеда, соответственно; K_t, K_p – комплексные переменные.

Из приведенных переменных величин, стоящих под знаком функции, необходимо выделить те, которые в большей степени влияют на процесс теплоотдачи в исследованных условиях и исключить из числа аргументов те переменные, которые незначительно влияют на теплоотдачу при кипении. Кроме того, из числа аргументов исключаются величины, которые являются постоянными в исследованных условиях.

Установлено, что на интенсивность теплоотдачи наибольшее влияние оказывают плотность теплового потока q и давление (температура) насыщения p . Влияние величин q и p определяется числом Рейнольдса кипения Re и числом K_p . При реализации условий беспрепятственного отвода паровой фазы из области кипения теплоотдача при пузырьковом кипении не зависит от формы и ориентации теплоотдающей поверхности, следовательно ускорение сил поля тяжести не оказывает заметного влияния на теплоотдачу, и число Архимеда кипения можно исключить из числа аргументов. Таким образом, критериальная зависимость, описывающая теплоотдачу при кипении фреона 134а на гладкой технически шероховатой поверхности может быть записана в виде:

$$Nu = f(Re, Pr, K_p). \quad (4)$$

Уравнение для определения коэффициента теплоотдачи в критериальном виде тогда запишется:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot K_p^s \cdot Pr^n. \quad (5)$$

Здесь

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda_{ж}}, \quad Re = \frac{q}{r \rho_n v} \cdot l_0, \quad K_p = \frac{p_n}{\sqrt{\sigma g (\rho_{ж} - \rho_n)}}, \quad Pr = \frac{v}{a}.$$

где l_0 – определяющий размер, м; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м²·К); $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; ρ_n – плотность паровой фазы, кг/м³; r – теплота парообразования, Дж/кг; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; v – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Теплофизические свойства жидкости и пара берутся при температуре насыщения.

За определяющий размер принята величина l_0 , непосредственно связанная с размером отрывного пузыря:

$$l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_n)}},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Число K_p может рассматриваться как комбинация двух обобщенных переменных, одна из которых представляет собой безразмерную форму перепада давления на границе раздела фаз $\frac{\Delta p}{\sigma/l_0}$, а вторая – относительную величину этого перепада – $\frac{\Delta p}{p}$.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче [8] по формуле (4) было получено следующее уравнение:

$$Nu = 9 \cdot Re^{0,44} \cdot K_p^{1,1} \cdot Pr^{-0,35}. \quad (6)$$

Результаты опытов описываются полученной зависимостью с погрешностью $\pm 20\%$ (рис. 4), что подтверждает корректность выбранного метода. Полученную критериальную зависимость можно рекомендовать для инженерных расчетов интенсивности теплоотдачи при кипении фреона 134а в условиях большого объема.

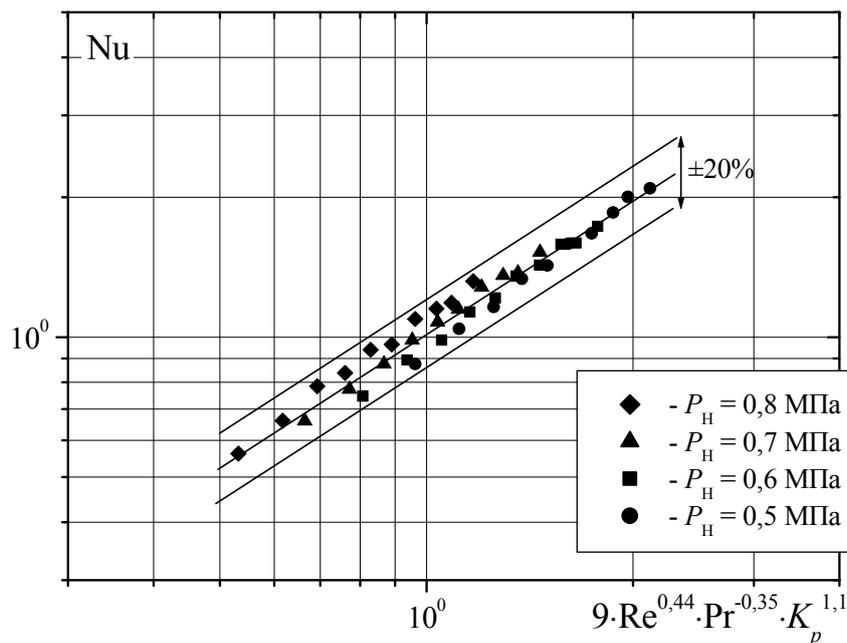


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении фреона 134а на гладких технически шероховатых поверхностях

Выводы

Проведены экспериментальные исследования процесса кипения фреона 134а при давлении насыщения $p_H = 0,5–0,8$ МПа на гладкой технически шероховатой поверхности. Получены количественные зависимости температурного напора и коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока.

Определено, что интенсивность теплоотдачи при кипении фреона 134а во всем диапазоне исследуемых давлений постоянно возрастает с увеличением давления насыщения.

Получено критериальное уравнение, позволяющее рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении фреона 134а с погрешностью $\pm 20\%$ в диапазоне тепловых потоков $8–63$ кВт/м² и давлений насыщения $p_H = 0,5–0,8$ МПа в условиях большого объема.

Литература

1. Бабакин, Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. – Москва : Колос, 2000. – 160 с.
2. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2002. – № 2. – С. 31–37.
3. Мурин, Г. А. Теплотехнические измерения / Г. А. Мурин. – Москва : Энергия, 1968. – 584 с.
4. Зайдель, А. И. Ошибки измерения физических величин / А. И. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1974. – 106 с.
5. Теория и техника теплофизического эксперимента / Ю. Ф. Гортышов [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

6. Дюндин, В. А. Исследование теплообмена при кипении фреона 12 на гладкой и ребристой трубах / В. А. Дюндин // Холодильная техника. – 1969. – № 11. – С. 16–22.
7. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – Москва : Высш. шк., 1986. – 352 с.
8. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании : учебник для вузов / А. М. Кутепов. – Москва : Высш. шк., 1977.

Получено 29.08.2006 г.