УДК 536.24

КИПЕНИЕ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ И НЕАЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ ВНУТРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГЛАДКИХ ТРУБ

Мезенцева Н.Н.[1], Мухин В.А.[2], Мезенцев И.В.[1]

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Сибирский Государственный Университет путей сообщения, Новосибирск, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке НШ-6078.2012.8.

АННОТАЦИЯ

В работе проведен анализ экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи, полученных разными авторами при исследовании кипения однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей внутри горизонтальных гладких труб. Проведенный анализ позволил выделить два различных режима теплообмена: режим пузырькового кипения и режим испарения при вынужденной конвекции. Граница между этими режимами определяется величиной критерия Thonon. В области пузырькового кипения опытные данные хорошо согласуются с зависимостью Гогонина (2006). В области испарения при вынужденной конвекции все опытные данные описываются с погрешностью ±30 % предложенной нами зависимостью с использованием критерия Локкарта - Мартинелли. Было установлено, что при кипении неазеотропных смесей в трубах диффузионное сопротивление, в отличие от кипения в большом объеме, роли не играет.

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и моделирования теплообменных аппаратов необходимы уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей, учитывающие особенности процесса. Считается, что при кипении бинарных смесей происходит интенсивное выделение легкокипящего компонента и, соответственно, меняется концентрация раствора, которая приводит к изменению температурного напора стенка-жидкость. При изменении концентрации в растворе появляется дополнительное диффузионное сопротивление в жидкости. Также на теплоотдачу влияет неизотермичность фазового перехода, или температурный глайд. Для однокомпонентных веществ предложено значительное число корреляций. Тем не менее, лишь немногие уравнения пригодны для смесей хладагентов. Применимость этих общих соотношений для смесей должна быть доказана.

Представленные в литературе расчетные зависимости для вычисления коэффициента теплоотдачи можно классифицировать на две категории.

К первой категории относятся модели *Liu and Winterton (1991), Wattelet et al. (1994), Bivens and Yokozeki (1994), Шуршева (2006), Даниловой (1983)* и др. В этих работах при расчете теплообмена при кипении жидкости в горизонтальных трубах учитываются две составляющие: теплоотдача при вынужденном течении чистой жидкости и при пузырьковом кипении. В одних работах предлагается вклады парообразования и конвекции суммировать во всем диапазоне параметров. А в других работах предлагается использовать асимптотический подход, предложенный *Кутателадзе (1961)*.

Ко второй категории можно отнести работы *Mishra et al. (1981), Chen (1966), Bennett-Chen (1980)* и др. В этих работах, также как и в первой группе, учитывают две составляющие теплообмена, но влияние кипения учитывают с помощью параметра Локкарта-Мартинелли. Авторами *Sami et al. (1992), Shin et al. (1996)*

© Мезенцева Н.Н., Мухин В.А., Мезенцев И.В.

учитывается разность концентраций компонентов в жидкой и паровой фазах.

Несмотря на множество экспериментальных данных, обобщения коэффициента теплоотдачи в одну достаточно надежную и точную для практических расчетов функцию до сих пор сделать не удалось. Основная причина - сложность механизма процесса кипения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Структуру двухфазного потока в обогреваемых горизонтальных каналах можно представить в следующем виде (рис.1).

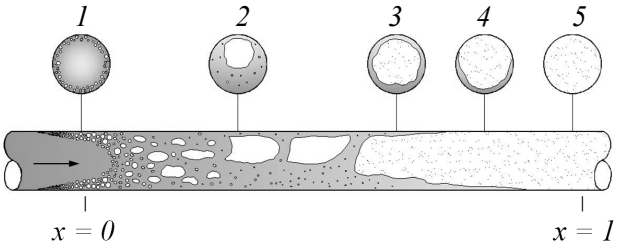

Рис.1 Схема режимов течения парожидкостной смеси в горизонтальных обогреваемых трубах (1- пузырьковый режим, 2 – снарядный режим, 3 – дисперсно-кольцевой, 4 – серповидный, 5 - дисперсный).

Нами были обработаны результаты экспериментальных работ по исследованию кипения однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей следующих авторов: *Kim (2000), Shin (1997), Hihara (1989), Yoshida (1994), Zhang (1997), Jung (1989), Lu DingChang (1986), Шуршев (1997)*. В этих работах в качестве однокомпонентных хладагентов рассмотрены R32, R134a, R22, также рассмотрены неазеотропные смеси R22/R114, R22/R142b и R32/R134a. Исследования вышеприведенных авторов были проведены на горизонтальных трубках из нержавеющей стали и меди, массовые расходы варьировались в пределах 200 - 583 кг/м^2×с, удельный тепловой поток изменялся от 10 до 30 кВт/м^2. При обработке опытных данных свойства однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей определялись по международной базе данных REFPROP Version 8.0 [1].

Учитывая, что все опыты, в которых исследовался теплообмен при кипении, были проведены на длинных трубах, где участки занятые пузырьковым и снарядным режимами имели малую протяженность. Основной участок трубы был занят режимом, когда на стенке была пленка жидкости.

Все экспериментальные данные обработаны в координатах $a_Э / a_K$ от $1/X_{tt.}$ Параметр Локкарта-Мартинелли (1) обычно используют при двухфазном кольцевом режиме течения, он также применим к течению с испарением:

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0.1} \qquad (1)$$

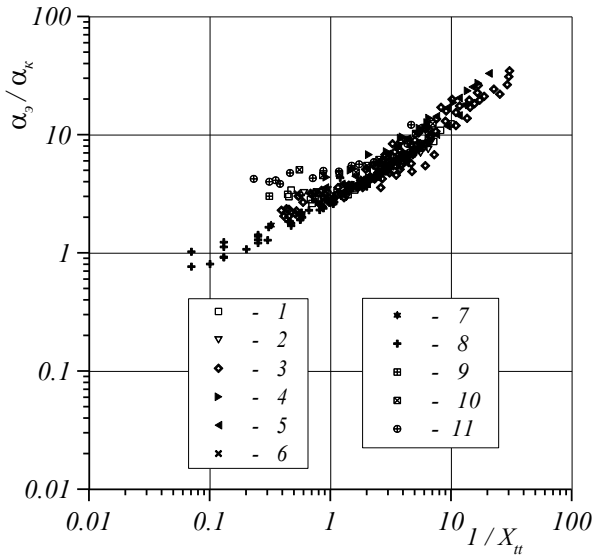

Рис.2 Изменение отношения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от параметра Мартинелли различных хладагентов *(1 – Shin R32/R134a, 2 – Kim R32/R134a, 3 – Hihara R22/R114, 4 – Lu DingChang R32/R134a, 5 – Yoshida R32/R134a, 6 – Zhang R32/R134a, 7 – Jung R22/R114, 8 – Шуршев R22/R142b, 9 – Shin R32, 10 – Shin R134a, 11 – Hihara R22).*

При определении коэффициента теплоотдачи при конвекции использовалась формула *Dittus, Boelter (1930).*

$$a_K = 0.023 \times (\lambda_l / D) \times Re_{tp}^{0.8} \times Pr_l^{0.4} \quad (2)$$

Критерий Рейнольдса определялся с учетом паросодержания x:

$$\mathrm{Re}_{tp} = \frac{G \cdot (1-x) \cdot D}{\mu_l} \quad (3)$$

На рис. 2 в области малых значений $1/X_{tt}$ наблюдается явное изменение в характере зависимости $a_э/a_K$ Это изменение связано с переходом от режима пузырькового кипения к режиму испарения при вынужденной конвекции. При больших значениях $1/X_{tt}$, все экспериментальные данные укладываются на одну зависимость.

В работе *Thonon* [2] высказано предположение, что точка перехода от одного режима киепния к другому определяется величиной критерия $Bo \times X_{tt} = 0{,}00015$ (рис.3).

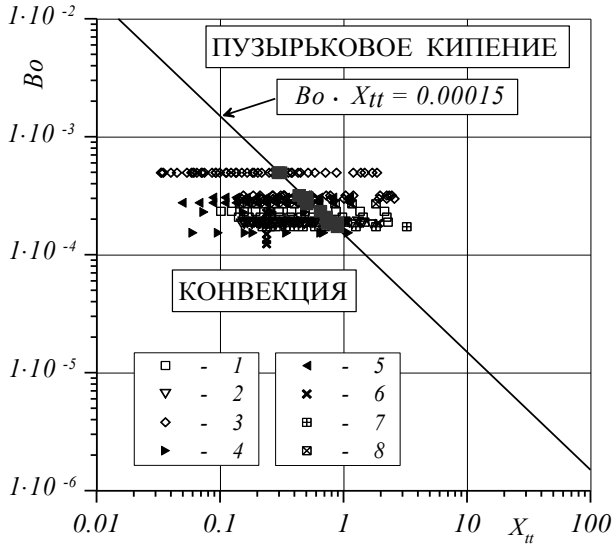

Рис.3 Изменение режима кипения в зависимости от критерия *Thonon (1 – Shin R32/R134a, 2 – Kim R32/R134a, 3 – Hihara R22/R114, 4 – Lu DingChang R32/R134a, 5 – Yoshida R32/R134a, 6 – Zhang R32/R134a, 7 – Shin R32, 8 – Shin R134a).*

На рис. 3 крупными символами обозначены экспериментальные значения Bo и X_{tt} соответствующие точке перехода от одного режима к другому. Видно, что эти значения вполне удовлетворительно совпадают с зависимостью *Thonon*. Представленные экспериментальные данные лежат как в области пузырькового кипения (паросодержание обычно меньше 0.3), так и в области вынужденной конвекции (паросодержание больше 0.3).

ПУЗЫРЬКОВОЕ КИПЕНИЕ

Известно, что при развитом пузырьковом кипении в трубах коэффициент теплоотдачи описывается теми же зависимостями, что и при кипении в большом объеме (*Кутателадзе*). Для области пузырькового кипения были проведены расчеты коэффициента теплоотдачи по зависимостям *Кутателадзе (1961), Cooper (1984), Гогонина* [3]. Коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по зависимости *Гогонина* учитывающей влияние на теплоотдачу теплофизических свойств стенки и её шероховатость достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными (рис.4). Эта зависимость была получена на основании обработки опытных данных при кипении однокомпонентных хладагентов, азота, пропана.

$$Nu^* = 0.01 \cdot \mathrm{Re}_*^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot b \cdot K_t^{0.4} \cdot \overline{R}_z^{0.2} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda_W \cdot c_W \cdot \rho_W} \right)^{-0.2} \quad (4)$$

В качестве характерного размера используется капиллярная постоянная:

$$Nu^* = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} \quad (5)$$

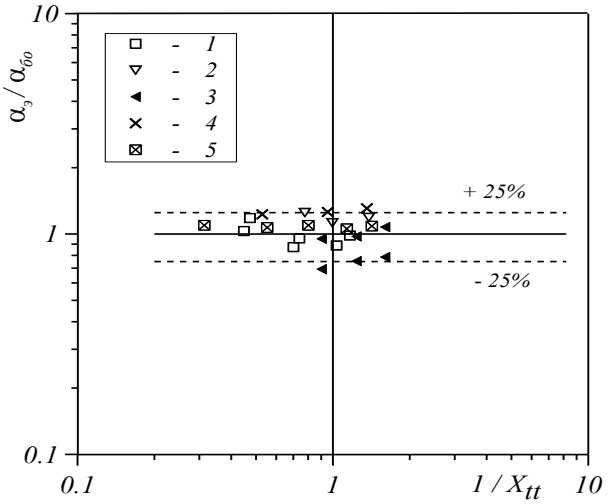

Рис.4 Изменение отношения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от параметра Локкарта и Мартинелли при пузырьковом кипении *(1 – Shin R32/R134a, 2 – Kim R32/R134a, 3 – Yoshida R32/R134a, 4 – Zhang R32/R134a, 5 – Shin R134a).*

Анализ рис. 4 показывает, что отклонение экспериментальных данных от расчетной зависимости *Гогонина (2006)* не превышает ±25%.

Таким образом, зависимость *(4)* можно рекомендовать для определения коэффициента теплоотдачи, как для однокомпонентных хла-

дагентов, так и для неазеотропных смесей в области пузырькового кипения в трубах.

ИСПАРЕНИЕ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

На рис. 5 приведены экспериментальные данные авторов для однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей, соответствующие испарению при вынужденной конвекции. Экспериментальные данные, которые представлены на рис. 5 обобщаются зависимостью вида:

$$a_{РАСЧЕТ} / a_{К} = A \times (1 / X_{tt})^{n} \quad (6)$$

Зависимость такого вида *(6)* была предложена впервые авторами *Dengler and Addom's (1956)* при изучении теплоотдачи в восходящем потоке пароводяной смеси.

При обработке экспериментальных данных по зависимости *(6)* нами получены следующие коэффициенты: $A = 2.33$ и $n = 0.78$.

$$a_{РАСЧЕТ} / a_{К} = 2.33 \times (1 / X_{tt})^{0.78} \quad (7)$$

Результаты расчета по зависисости *(7)* в сопоставлении с экспериментальными данными разных авторов для однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей приведены на рис. 5.

Зависимость *(7)* описывает результаты экспериментальных данных по однокомпонентным хладагентам и неазеотропным смесям с погрешностью ± 30% (рис. 5).

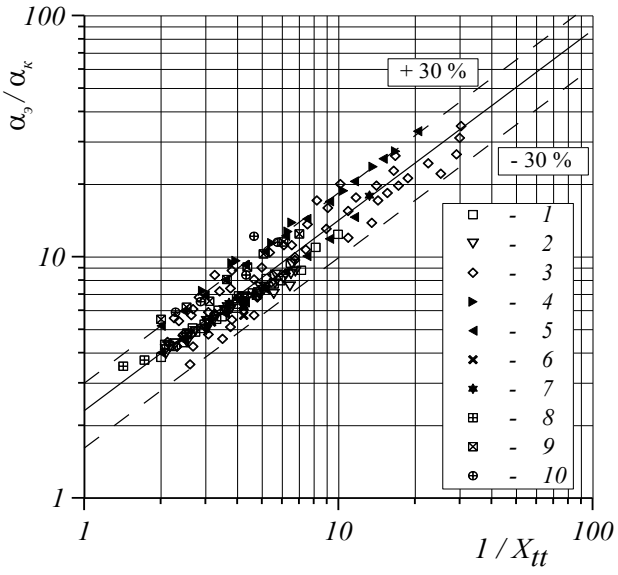

Рис.5 Изменение отношения коэффициентов теплоотдачи для различных хладагентов при вынужденной конвекции *(1 – Shin R32/R134a, 2 – Kim R32/R134a, 3 – Hihara R22/R114, 4 – Lu DingChang R32/R134a, 5 – Yoshida R32/R134a, 6 – Zhang R32/R134a, 7 – Jung R22/R114, 8 – Shin R32, 9 – Shin R134a, 10 – Hihara R22).*

ВЫВОДЫ

При кипении хладагентов внутри горизонтальных гладких труб можно выделить две различные области: область пузырькового кипения и область испарения при вынужденной конвекции. Границу между ними можно определить с помощью значения $Bo \times X_{tt} = 0{,}00015$ (*Thonon, 1995)*.

Для определения коэффициента теплоотдачи в области пузырькового кипения, как для однокомпонентных хладагентов, так и для неазеотропных смесей можно рекомендовать зависимость *Гогонина (2006)*. Отклонение экспериментальных данных от этой зависимости не превышает ±25%.

Для определения коэффициента теплоотдачи в области испарении при вынужденной конвекции для однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей с неизотермичностью фазового перехода до 20 °С можно рекомендовать зависимость вида: $a_{РАСЧЕТ} / a_{К} = 2.33 \times (1 / X_{tt})^{0.78}$ Данная зависимость описывает экспериментальные данные с погрешностью ±30%.

Было установлено, что при интенсивном вынужденном движении неазеотропных смесей в трубах диффузионные процессы, в отличие от кипения неазеотропных смесей в большом объеме, роли не играют.

ЛИТЕРАТУРА

1. NIST Thermodynamic and Transport Properties. Standard Reference Database 23, version 8.0. 2007.
2. Thonon, B., Vidil, R., Marvillet, C. (1995), "Recent research and developments in plate heat exchangers", *Enhanced Heat Transfer*, Vol. 2 N 1-2, pp.149-155.
3. Gogonin, I.I. (2006), "The dependence of boiling heat transfer on the properties and geometric parameters of heat-transfer wall", *High Temperature*, Vol. 44 N 6, pp 913-921.