

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

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

mnn@itp.nsc.ru, mezn@itp.nsc.ru, mukhva@ngs.ru

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ НЕАЭЗОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Несмотря на множество эмпирических зависимостей, в настоящее время имеющихся в распоряжении исследователей, достаточно надежной и физически обоснованной методики расчета коэффициента теплоотдачи при кипении неаэотропных бинарных смесей нет. Основная причина – сложность механизма кипения. Неаэотропные смеси характеризуются неизотермичностью фазового перехода, или температурным глайдом. Для анализа были отобраны результаты экспериментальных работ по кипению неаэотропных смесей внутри горизонтальных гладких труб. Исследования проведены на горизонтальных гладких стальных и медных трубках, массовые скорости варьировались в пределах 50–583 кг/м²·с, удельный тепловой поток изменялся от 1 до 45 кВт/м². Результаты экспериментальных данных, соответствующие области пузырькового кипения, были сопоставлены с расчетными зависимостями. В ходе анализа рассмотрены зависимости, соответствующие кипению в большом объеме. Предложено коэффициент теплоотдачи определять по зависимости Гогонина (2006), которая достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными. Она учитывает влияние на теплоотдачу теплофизических свойств стенки и ее шероховатость. Кроме того установлено, что при вынужденном течении парожидкостного потока в трубах при пузырьковом кипении диффузионные процессы, в отличие от кипения в большом объеме, роли не играют.

Ключевые слова: теплообмен при кипении, неаэотропные смеси, диффузионные процессы.

Определение коэффициента теплоотдачи при кипении в горизонтальных трубах

Для технико-экономического анализа и подбора теплообменного аппарата необходимы знания коэффициента теплоотдачи. При использовании неаэотропных смесей (например, в испарителе теплового насоса) необходимо учитывать особенности процесса теплоотдачи. При кипении бинарных смесей происходит интенсивное выделение легкокипящего компонента, и, соответственно, изменяется концентрация раствора, что приводит к изменению температурного напора стенка-жидкость. При изменении концентрации в растворе появляется дополнительное диффузионное сопротивление в жидкости.

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: режим течения, расходное массовое паросодержание, массовая скорость, давление, тепловой поток, теплофизические свойства жидкости, диаметр и длина трубы. Нами были обработаны экспериментальные работы различных авторов по кипению неаэотропных смесей *R22/R114*, *R22/R142b* и *R32/R134a*: *Shin (1997)* [1], *Kim (1999)* [2], *Hihara (1989)* [3], *Yoshida (1994)* [4], *Zhang (1997)* [4], *DingChang (1986)* [5], *Шуришев (1997)* [6]. Исследования проведены на горизонтальных нержавеющей гладких стальных и медных трубках, массовые скорости варьировались в пределах 50–583 кг/м²·с, удельный тепловой поток изменялся от 1 до 45 кВт/м². При обработке опытных данных свойства неаэотропных

Мезенцева Н. Н., Мезенцев И. В., Мухин В. А. Теплообмен при пузырьковом кипении неаэотропных смесей в горизонтальных трубах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 3. С. 46–52.

смесей определялись по базе данных REFPROP Version 8.0 [7].

Все экспериментальные данные представлены в следующих координатах: по оси абсцисс обратный параметр Локкарта – Мартинелли [8] по оси ординат отношение экспериментального коэффициента теплоотдачи к коэффициенту теплоотдачи, определяемому по формулам для однофазной конвекции с учетом паросодержания [9]. На графике (рис. 1.) можно выделить две области. В области, где $1/X_{tt} > 1$, все точки укладываются на одну общую зависимость. При $1/X_{tt} < 1$ мы видим область, где наблюдается расслоение.

Для наглядного анализа возьмем результаты *Shin* из графика. На рис. 2 наблюдается явный перегиб в характере зависимости. В работе *Thonon* [10] высказано предположение, что переход от одного режима к другому определяется зависимостью вида

$$Bo \cdot X_{tt} = 1,5 \cdot 10^{-4}.$$

Обработка результатов *Shin* в координатах Bo и X_{tt} представлена на рис. 3. Точка пере-

хода от одного режима к другому совпадает с утверждением *Thonon*.

Были обработаны все экспериментальные данные по зависимости *Thonon* (рис. 4). Видно, что данные находятся как в области пузырькового кипения, так и в области конвективного теплообмена.

Известно, что при развитом пузырьковом кипении в трубах коэффициент теплоотдачи описывается теми же зависимостями, что и при кипении в большом объеме [11]. Для области пузырькового кипения были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи для однокомпонентных хладагентов и неазеотропных смесей по зависимостям *Кутателадзе (1961)* [12], *Cooper (1984)* [13], *Гогонина (2006)* [14] для кипения однофазных жидкостей в большом объеме. Также экспериментальные данные были сопоставлены с зависимостью *Гогонина (2013)* [15], в которой учтены влияние диффузии и эффект выпаривания легколетучего компонента из смеси. Результаты сравнения по вышеприведенным зависимостям представлены

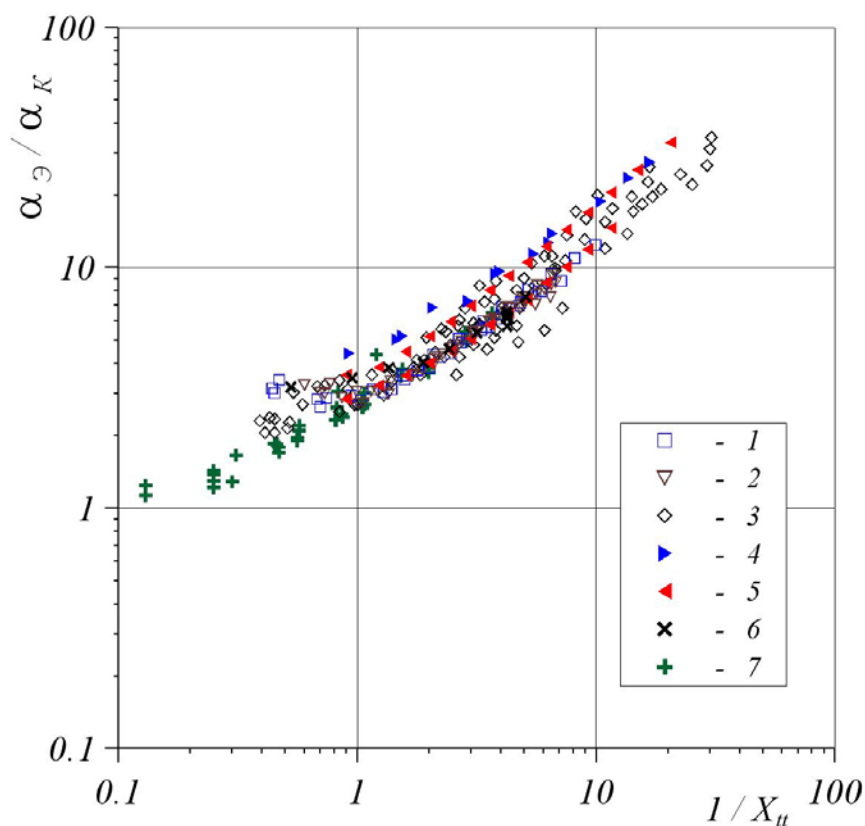


Рис. 1. Изменение отношения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от параметра Локкарта – Мартинелли для различных хладагентов: 1 – *Shin* R32/R134a; 2 – *Kim* R32/R134a; 3 – *Hihara* R22/R114; 4 – *DingChang* R32/R134a; 5 – *Yoshida* R32/R134a; 6 – *Zhang* R32/R134a; 7 – *Шуришев* R22/R142b

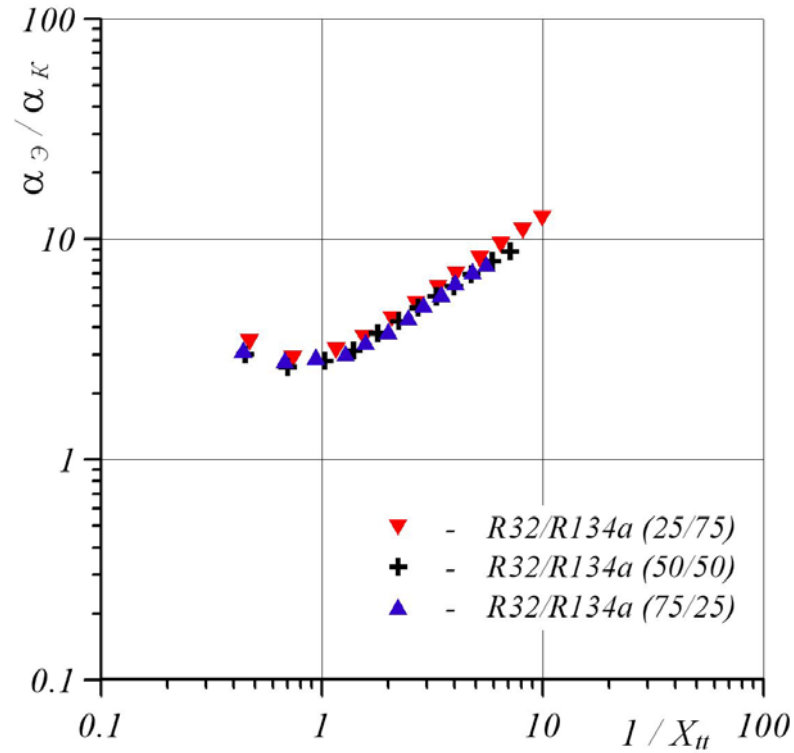


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных автора Shin (1997) для неazeотропной смеси R32/R134a с различной концентрацией компонентов

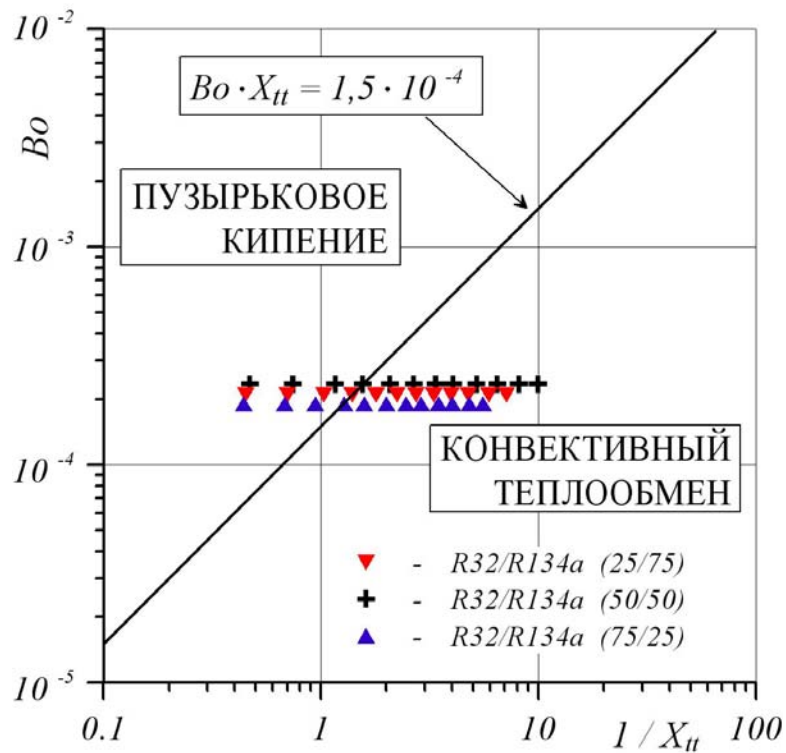


Рис. 3. Изменение режима кипения в зависимости от критерия Thonon экспериментальных данных Shin (1997) с различной концентрацией компонентов неazeотропной смеси R32/R134a

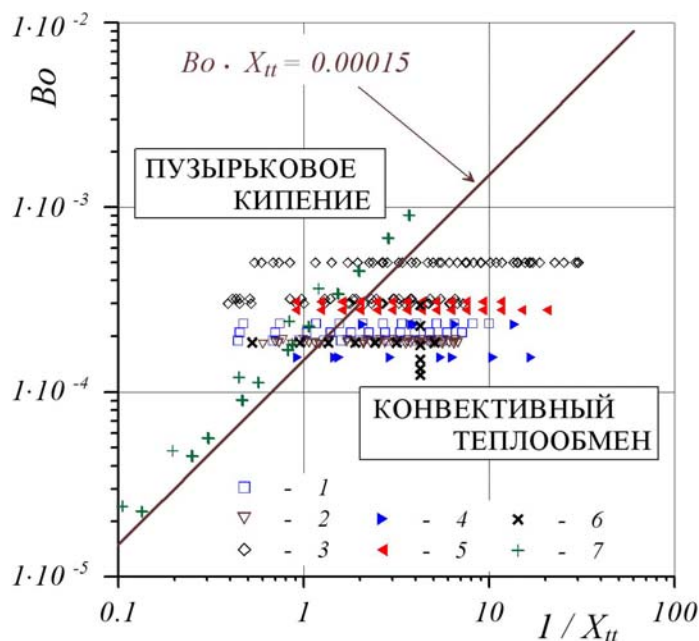


Рис. 4. Изменение режима кипения в зависимости от критерия Thonon: 1 – Shin R32/R134a; 2 – Kim R32/R134a; 3 – Hihara R22/R114; 4 – DingChang R32/R134a; 5 – Yoshida R32/R134a; 6 – Zhang R32/R134a; 7 – Шуршев R22/R142b

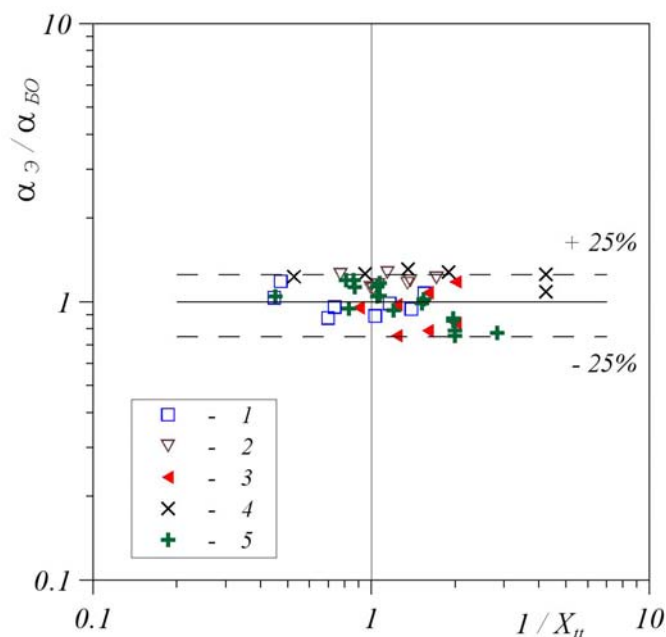


Рис. 5. Изменение отношения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от параметра Локкарта – Мартинелли при пузырьковом кипении: 1 – Shin R32/R134a; 2 – Kim R32/R134a; 3 – Yoshida R32/R134a; 4 – Zhang R32/R134a; 5 – Шуршев R22/R142b

в таблице. Зависимость Гогонина (2013), которая учитывает диффузионные процессы, описывает экспериментальные данные с большим отклонением. Среди остальных зависимостей, не учитывающих диффузию, наименьшие отклонения имеет зависимость Гогонина (2006).

Таким образом, зависимость Гогонина (2006) можно рекомендовать для определения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении неазеотропных смесей в трубах (рис. 5). Эта зависимость была получена на основании обработки опытных

Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными

α_3	Кутателадзе (1961)		Соопер (1984)		Гогонин (2006)		Гогонин (2013)	
	α_p	отклонение	α_p	отклонение	α_p	отклонение	α_p	отклонение
<i>Shin R32/R134a (50/50)</i>								
4667	3351	28,2	6271	34,4	4504	3,5	2972	36,3
3944	3222	18,3	6271	59,0	4504	14,2	2854	27,6
4011	3202	20,2	6271	56,3	4504	12,3	2866	28,5
4256	3209	24,6	6271	47,3	4504	5,8	2907	31,7
<i>Shin R32/R134a (25/75)</i>								
4533	2914	35,7	5399	19,1	3821	15,7	2596	42,7
3667	2779	24,2	5399	47,2	3821	4,2	2467	32,7
3778	2764	26,8	5399	42,9	3821	1,1	2485	34,2
4111	2785	32,3	5399	31,3	3821	7,1	2536	38,3
<i>Yoshida R32/R134a (30/70)</i>								
2342	1511	35,5	3044	30,0	1899	18,9	1321	43,6
2400	1496	37,7	3044	26,8	1899	20,9	1328	44,7
<i>Yoshida R32/R134a (30/70)</i>								
4288	3043	29,0	6271	46,2	4490	4,7	2799	34,7
4394	3036	30,9	6271	42,7	4490	2,2	2815	35,9
4848	3078	36,5	6271	29,4	4490	7,4	2882	40,6

Примечание: α_3 – экспериментальный коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; α_p – расчетный коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; отклонение $100 \cdot ((\alpha_3 - \alpha_p) / \alpha_3)$, %.

данных при кипении однокомпонентных хладагентов, азота и пропана.

Вывод

Коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по зависимости Гогонина (2006), достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными. Отклонение составляет $\pm 25\%$. Данная зависимость учитывает влияние на теплоотдачу теплофизических свойств стенки и ее шероховатость.

Установлено, что при вынужденном течении парожидкостного потока в трубах при пузырьковом кипении неазеотропных смесей диффузионные процессы, в отличие от кипения в большом объеме, роли не играют.

Список литературы

1. *Shin J. Y., Kim M. S., Ro S. T.* Experimental study on forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures in a horizontal tube // *International Journal of Refrigeration*. 1997. Vol. 20. No. 4. P. 267–275.
2. *Kim Y. J., Choi T. Y., Kim M. S., Ro S. T.* Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, № 19. P. 3651–3660.
3. *Hihara E., Kazuhiro T., Takamodo S.* Forced convective boiling experiments of binary mixtures // *JSME Int. J. Ser. 2*. 1989. Vol. 32, № 1. P. 98–106.
4. *Zhang L., Hihara E., Saito T., Oh J. T.* Boiling heat transfer of a ternary refrigerant mixture inside a horizontal Smooth tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40, № 9. P. 2009–2017.
5. *Ding Chang L.* Experiment and analysis on the evaporation heat refrigerant blends R32/R134a. Report of the National Committee of the results of scientific research Special topics: NCS-86-2212-E009-041 // Transport University, department of Mechanics. Experimental period: 01.08.1985 – 31.07.1986.
6. *Шуришев В. Ф.* Моделирование и экспериментальное исследование процесса теплоотдачи при кипении смесей холодильных агентов: Моногр. 2006. С. 112.
7. NIST Thermodynamic and Transport Properties. Standard Reference Database 23, version 8.0. 2007.
8. *Lockhart R. W., Martinelli R. C.* Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes // *Chemical Engineering Progress*. 1949. Vol. 45. P. 39–48.
9. *Dittus F. W., Boelter L. M.* University of California Publications on Engineering. 1930. Vol. 2. P. 443.
10. *Thonon B., Vidil R., Marvillet C.* Recent research and developments in plate heat exchangers // *Enhanced Heat Transfer*. 1995. Vol. 2, № 1–2. P. 149–155.
11. *Кутателадзе С. С.* Влияние скорости циркуляции на коэффициент теплопередачи при кипении в трубах // *Энергомашиностроение*. 1961. № 1. С. 12.
12. *Kutateladze S. S.* Boiling heat transfer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1961. Vol. 4. P. 31–15.
13. *Cooper M. G.* Saturation Nucleate Pool Boiling, A Simple Correlation // 1st U.K. National Conference on Heat Transfer. 1984. Vol. 2. P. 785–793.
14. *Gogonin I. I.* The dependence of boiling heat transfer on the properties and geometric parameters of heat-transfer wall // *High Temperature*. 2006. Vol. 44, № 6. P. 913–921.
15. *Гогонин И. И.* Теплообмен при кипении бинарных смесей в условиях свободной конвекции // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 3. С. 646–651.

N. N. Mezentseva, I. V. Mezentsev, V. A. Mukhin

*Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS
1 Acad. Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

mnn@itp.nsc.ru, mezn@itp.nsc.ru, mukhva@ngs.ru

**AT NUCLEATE BOILING HEAT TRANSFER ZEOTROPIC
MIXTURES A HORIZONTAL TUBES**

Despite numerous empirical relationships, currently there is no sufficiently reliable and physically reasonable methodology for calculating the heat transfer coefficient at boiling the zeotropic binary blends. The main reason is the complexity of the boiling process mechanism. Zeotropic blends have the non-isothermal phase transition or the temperature glide. To perform the analysis, the results of experimental work on boiling the zeotropic blends inside the horizontal smooth tubes were processed. The studies were carried out with the horizontal smooth steel and copper tubes; the mass velocities were varied within 50–583 kg/m²·s; the specific heat flux was varied from 1 to 45 kW/m². The experimental data, corresponding to the region of nucleate boiling, were compared with the calculated dependencies. The dependences corresponding to pool boiling were also analyzed. It was proposed to determine the heat transfer coefficient by Gogonin's dependence (2006); this coincides well with the experimental data. This dependence takes into account the effect of wall thermal properties and its roughness on heat transfer. Moreover, it was found out that, in contrast to pool boiling, for the forced vapor-liquid flow in pipes at nucleate boiling, the diffusion processes are not important.

Keywords: heat transfer at boiling, zeotropic blends, diffusion processes.