

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 621.56; 536.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-106-112

Анализ применимости методик расчета коэффициента теплоотдачи при кипении многокомпонентных рабочих тел

А.С. Должиков, В.И. Могорычный

Многокомпонентные рабочие тела широко применяются в холодильной и криогенной технике. Одним из основных элементов данных систем является рекуперативный теплообменник, влияющий на эффективность всей низкотемпературной установки. В нем осуществляется регенерация холода: обратный поток (низкое давление) охлаждает прямой (высокое давление). В прямом потоке происходит конденсация потока рабочего тела, а в обратном — кипение. Таким образом, важно уметь определять конструкцию данного теплообменника при проектировании низкотемпературных систем. Однако процесс кипения и конденсации смесей остается недостаточно изученным из-за малого количества экспериментальных данных, а, соответственно, и эмпирических соотношений, позволяющих описывать подобные процессы. Вследствие этого возникают проблемы при проектировании теплообменников для низкотемпературных систем, работающих на смесевых рабочих телах.

Рассмотрены различные существующие соотношения, позволяющие описывать процесс кипения многокомпонентных рабочих тел при низких температурах, а также проведено сравнение результатов, полученных с использованием данных соотношений, с существующими экспериментальными данными по кипению смесей. Значения коэффициента теплоотдачи, вычисленные с помощью метода Мишра, имеют лучшее совпадение с экспериментальными данными по сравнению с результатами, полученными из других соотношений. Поскольку экспериментальные данные доступны для небольшого числа опытов, в которых используются смеси одинакового состава с одинаковыми рабочими давлениями и массовыми расходами, то было бы некорректно делать окончательный вывод о применимости соотношений. Анализ, производимый в данной работе, является шагом по направлению к детальному пониманию применимости соотношений для многокомпонентных смесей. Необходимы более полные экспериментальные данные, полученные для одного и того же состава при различных условиях, чтобы понять влияние каждого параметра на коэффициент теплоотдачи при кипении. Знание коэффициента теплоотдачи необходимо при проектировании теплообменников для низкотемпературных установок, работающих на смесевом хладагенте.

Ключевые слова: низкие температуры, многокомпонентные рабочие тела, двухфазный поток, дроссельные системы, теплообмен, смеси.

Для цитирования: Должиков А.С., Могорычный В.И. Анализ применимости методик расчета коэффициента теплоотдачи при кипении многокомпонентных рабочих тел // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 106—112. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-106-112.

Analyzing the Applicability of Procedures for Calculating the Coefficient of Heat Transfer in Boiling of Multicomponent Working Fluids

A.S. Dolzhikov, V.I. Mogorychny

Multicomponent working fluids are widely used in refrigeration and cryogenic technologies. A recuperative heat exchanger, the device influencing the efficiency of the entire low-temperature installation, is one of the main elements of these systems. It serves to regenerate the cold: the reverse (low-pressure) flow cools the direct (high-pressure) flow. In the direct flow, the flow of working fluid condenses, and in the reverse flow it boils. Thus, it is important to know how the design of this heat exchanger shall be determined in designing low-temperature systems. However, the

boiling and condensation of mixtures still remain poorly studied due to a small amount of available experimental data and, accordingly, due to a limited number of empirical correlations describing these processes. As a result, those who develop heat exchangers for low-temperature systems operating on mixed working fluids encounter certain difficulties in designing such devices.

The article describes various existing correlations describing the boiling of multicomponent working fluids at low temperatures and compares the results obtained using these correlations with the existing experimental data on the boiling of mixtures. The values of the heat transfer coefficient calculated using the Mishra method have better agreement with the experimental data in comparison with the results obtained from other correlations. However, since the experimental data are available for a small number of experiments, in which mixtures having the same composition, with the same operating pressures and mass flowrates are used, it would be incorrect to make a final conclusion about the applicability of the correlations. The analysis carried out in this article paper is a step toward detailed understanding of the applicability of correlations for multicomponent mixtures. More complete experimental data obtained for the same composition under different conditions are needed in order to understand the effect of each parameter on the boiling heat transfer coefficient. Reliable data on the heat transfer coefficient are necessary in designing heat exchangers for low-temperature installations operating on a mixed refrigerant.

Key words: low temperatures, multicomponent working fluids, two-phase flow, throttle systems, heat transfer, mixtures.

For citation: Dolzhikov A.S., Mogorychny V.I. Analyzing the Applicability of Procedures for Calculating the Coefficient of Heat Transfer in Boiling of Multicomponent Working Fluids. MPEI Vestnik. 2017; 6:106—112. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-106-112.

Введение

В криогенной и холодильной технике широко распространены системы, работающие на основе дроссельного цикла, благодаря надежности, простоте устройства, эксплуатации и невысокой стоимости. Одним из перспективных путей повышения эффективности циклов является применение многокомпонентных рабочих тел (МРТ), которые составляют путем смешения традиционно используемых или новых синтезированных однокомпонентных веществ. В отечественных и зарубежных исследованиях показано, что при работе низкотемпературных систем на смесях во многих случаях улучшаются энергетические и массогабаритные характеристики, увеличивается ресурс, повышается надежность работы, сокращается пусковой период [1 — 3].

Один из основных элементов дроссельного цикла (в частности, цикла Линде) — теплообменник. В одном из них (рекуперативный теплообменник) обратный поток охлаждает прямой (осуществляется регенерация холода), в результате чего в каналах происходит непрерывное кипение и конденсация МРТ. Другой является испарителем, к которому подводится нагрузка от охлаждаемого объекта. Таким образом, в потоках теплообменников непрерывен фазовый переход, рабочее тело находится в двухфазном состоянии. Перепад температур (изменение температуры потока между входом и выходом теплообменника) может составлять более 100 К, что, в свою очередь, сказывается на сильном изменении теплофизических свойств потока рабочего тела. Также очень сильно меняется доля жидкой и паровой фаз в потоке, что сказывается на наблюдаемых режимах течения потока в каналах теплообменника. Вследствие этого использование МРТ накладывает определенные требования на допустимые скорости потоков в каналах. При недостаточной скорости потока может произойти расслоение смеси, паровая фаза окажется наверху, а жидкая внизу, что ведет к нарушению фазового равновесия и, как следствие, ухудшению работы теплообменников [4 — 7].

В настоящее время в открытых литературных источниках отсутствует информация об универсальной методике расчета процессов кипения и конденсации при работе на смесевых хладагентах, даже для относительно простых и наиболее часто применяемых теплообменников типа «труба в трубе». Таким образом, целью данной работы является изучение применимости различных соотношений для описания процесса кипения МРТ и сравнение результатов, полученных с использованием данных соотношений, с существующими экспериментальными данными.

Соотношения для определения коэффициента теплоотдачи при кипении смеси

Существует не так уж много работ, посвященных исследованию процессов кипения и конденсации МРТ в области низких температур (<140 К). Авторами [8, 9] были проведены исследования смесей, состоящих из трех и более компонентов, а также ряд работ на бинарных смесях. Большинство методик, разработанных для смесей, основано на соотношениях, используемых для чистых веществ, с включением в них поправок, учитывающих многокомпонентность рабочего тела. Однако данные, полученные с помощью этих соотношений, носят частный характер и применимы для конкретной смеси и параметров потока.

Механизм теплопередачи при кипении МРТ отличается от аналогичного процесса для чистых веществ. В случае со смесями температура насыщения возрастает по мере выкипания низкокипящего компонента, а также имеет место процесс массопереноса через границу раздела жидкость — пар, вследствие наличия разности концентраций компонентов смеси в жидкой и паровой фазах. В процессе выкипания низкокипящего компонента концентрация его в паровой фазе увеличивается, а в жидкой — уменьшается. Известно, что при кипении смеси происходит снижение коэффициента теплоотдачи (КТО) в сравнении с КТО отдельно взятых компонентов смеси при одинаковых значениях плотности теплового потока и давления. Снижение КТО

тем существеннее, чем сильнее различаются составы жидкой и паровой фаз или чем сильнее изменяется температура кипения (между точками начала кипения и росы).

Зачастую методы расчета теплоотдачи при кипении смеси сводятся к нахождению поправочной функции K_0 и так называемого идеального КТО $\alpha_{ид}$ в соответствии с соотношением [10]

$$\alpha/\alpha_{ид} = 1/(1 + K_0),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

Для определения $\alpha_{ид}$ существует несколько подходов. В первом $\alpha_{ид}$ рассчитывается через КТО чистых компонентов с учетом их молярных долей в смеси. Во втором — через отношение плотности теплового потока к идеальному температурному напору $\Delta T_{ид}$, определяемому как

$$\Delta T_{ид} = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i \Delta T_i,$$

где \hat{x} — мольная доля компонента смеси; ΔT_i — температурный напор для i -го компонента смеси,

$$T_i = T_c - T_{s,i}$$

Выражение для идеального КТО имеет вид

$$\alpha_{ид} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{x}_i}{\alpha_i} \right)} = \frac{q}{\Delta T_{ид}}$$

Что касается поправочной функции K_0 , то для ее определения существует множество уравнений, большинство из них чисто эмпирические. Было выбрано следующее соотношение:

$$K_0 = \frac{\Delta T_{жп}}{\Delta T_{ид}} \left(1 - e^{\left(\frac{-B_0 q}{\beta \rho_{ж} h_{жп}} \right)} \right),$$

где $\Delta T_{жп}$ — температурный напор на границе раздела жидкость – пар; β — коэффициент массоотдачи на межфазной границе, для которого принимается значение $3 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Е. Гранрид разработал соотношение для конвективного кипения азеотропных смесей, основанное на теоретическом подходе для теплопередачи в кипящем двухфазном потоке с кольцевым режимом течения [11]. Данное выражение получено на основе анализа экспериментальных данных для смесей фреонов R22–R114 и R12–R152a. Коэффициент теплоотдачи, согласно Е. Гранриду, может быть определен из соотношения

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{ж} F(X_{тт})} + \frac{xc_{рп}}{\alpha_{п-п} \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p} C_{lv}$$

Параметр $F(X_{тт})$ для кипящего потока хладагента определяется из соотношения

$$F(X_{тт}) = 2,37 \left(0,29 + \frac{1}{X_{тт}} \right)^{0,85}$$

Параметр Мартинелли X используется для оценки влияния двухфазности потока на конвекцию. Для турбулентного режима течения жидкой фазы и турбулентного режима течения паровой фазы $X_{тт}$ выглядит как

$$X_{тт} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{п}} \right)^{0,1}$$

Здесь $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ — плотность жидкости и пара, кг/м³; $\mu_{ж}$, $\mu_{п}$ — динамическая вязкость жидкости и пара, Па·с.

Для жидкой и паровой фазы КТО рассчитывается по соотношению Диттуса – Белтера

$$\alpha = 0,023 \left(\frac{\lambda}{d_{вн}} \right) Re^{0,8} Pr^{0,4},$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; $d_{вн}$ — внутренний диаметр, м; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Поправочный коэффициент C_{lv} учитывает взаимодействие между газом и жидкостью. Е. Гранрид для случая испарения хладагентов советует принимать $C_{lv} = 2$.

У. Литтл описал соотношение [12], которое имеет схожий вид с формулой, представленной Е. Гранридом. Оно также основано на кольцевом режиме течения, который характеризуется раздельным течением жидкой и паровой фаз: жидкая пленка течет вдоль стенки трубы, а пар — по центру. Соотношение Литтла подходит для описания процесса кипения азеотропных смесей в горизонтальном канале. Оно было проверено на экспериментальных данных, представленных в [8], для азот-углеводородных смесей. Соотношение Литтла для КТО имеет вид

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{с-пл}} + \frac{xc_{рп}}{\alpha_{п-п} \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p} \frac{xc_{рп}}{(1-x)c_{рж} + xc_{рп}};$$

$$\alpha_{с-пл} = 0,023 \left(\frac{Re_{ж}}{1 + \sqrt{\phi_{ж}}} \right)^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \frac{\lambda_{ж}}{d_{вн} (1 - \sqrt{\phi_{ж}})};$$

$$\alpha_{п-п} = 0,023 \left(\frac{Re_{п}}{\sqrt{\phi_{ж}}} \right)^{0,8} Pr_{п}^{0,4} \frac{\lambda_{п}}{d_{вн} \sqrt{\phi_{ж}}};$$

$$\phi_{ж} = \left(1 + \frac{(1-x)\rho_{п}}{x\rho_{ж}} \sqrt{1-x \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} \right)} \right)^{-1},$$

где $\alpha_{с-пл}$ — КТО между стенкой и пленкой жидкости; $\alpha_{п-п}$ — КТО между пленкой жидкости и паром; $\phi_{ж}$ — истинное объемное влагосодержание (отношение площади, занимаемой жидкой фазой, к полному сечению канала); c_p — изобарная теплоемкость, Дж/кг·К.

В [13] предложено соотношение, позволяющее рассчитывать КТО при кипении смесей. Изначально оно было получено для расчета КТО жидкой фазы, а затем введен поправочный коэффициент, учитывающий процесс кипения многокомпонентной смеси. Данный коэффициент является функцией числа кипения (Bo) и параметра Локхарта – Мартинелли X_{TT} для случая турбулентного режима течения обеих фаз. Соотношение для определения КТО при кипении смесей имеет вид

$$\alpha = C\alpha_{ж} \left(\frac{1}{X_{TT}} \right)^m Bo^n,$$

а число кипения определяется из выражения

$$Bo = \frac{q}{Gh_{жп}},$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; G — массовый поток, кг/м²·с; h — энтальпия, Дж/кг.

Коэффициенты C , m и n определяются экспериментально для каждой смеси. Для проведения расчетов авторами $C = 21,75$; $m = 0,29$; $n = 0,23$.

Состав рабочих тел и параметры потока

Опыт	Состав смеси CH ₄ /C ₂ H ₆ /C ₃ H ₈	G, кг/м ² ·с	q, кВт/м ²	P, кПа	d _{вн} , мм
1	45/35/20	143	52,1	787	0,506
2	45/35/20	143	55,1	785	1,527
3	45/35/20	146	54,8	790	2,871

Описание эксперимента

В [14] приведено описание экспериментального стенда и методики, используемых для измерения КТО при кипении азот-углеводородных и аргон-фреоновых смесей в горизонтальном канале. В качестве участка использованы цилиндрические блоки известной геометрии, к которым подведена нагрузка во время прохождения потока рабочего тела. Состав смесей, параметры потока и характерный размер экспериментального участка приведены в табл. 1. Смесей во всех опытах содержат метан, этан и пропан. На основании информации об эксперименте, рассчитан КТО и проведено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными.

Обсуждение результатов

Представлены четыре различных подхода для определения КТО. Поскольку температура потока между входом и выходом экспериментального участка менялась не сильно, то все расчеты вели с использованием средней температуры потока. Теплофизические свойства смеси определяли с помощью программного пакета REFPROP. На рис. 1 — 3 показано сравнение рас-

Таблица 1

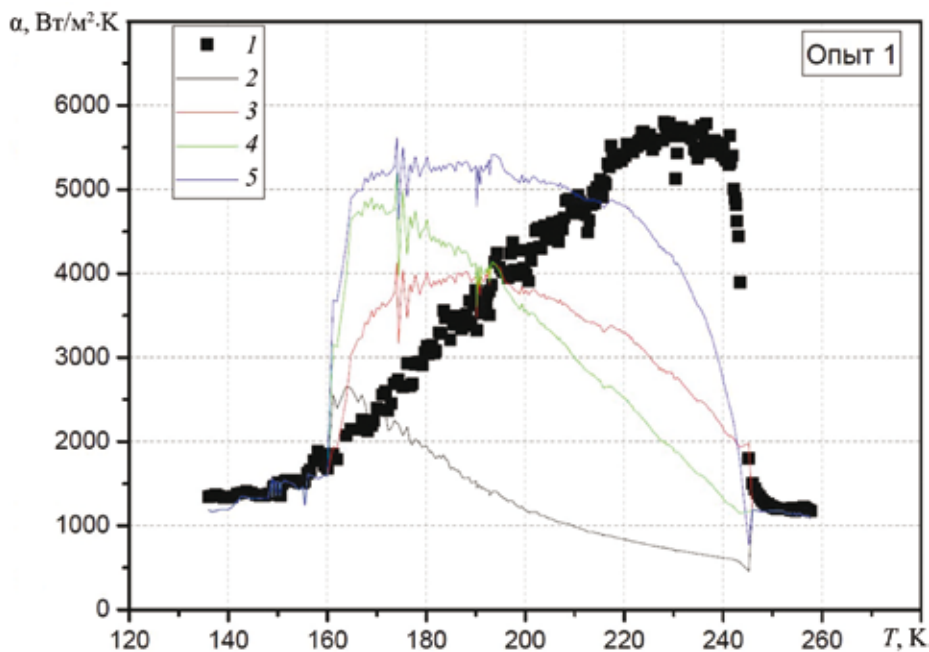


Рис. 1. Коэффициент теплоотдачи в зависимости от средней температуры потока. Опыт 1:

1 — эксперимент [14]; 2 — 5 — расчеты через идеальный КТО с поправочной функцией [10] и по соотношениям [11 — 13]

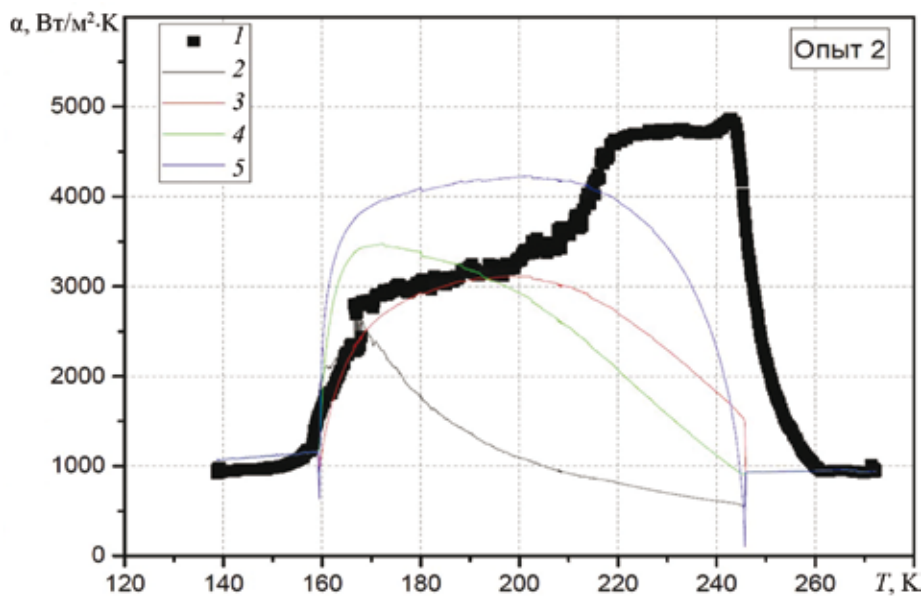


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи в зависимости от средней температуры потока. Опыт 2:
1 — эксперимент [14]; 2 — 5 — расчеты через идеальный КТО с поправочной функцией [10] и по соотношениям [11 —13]

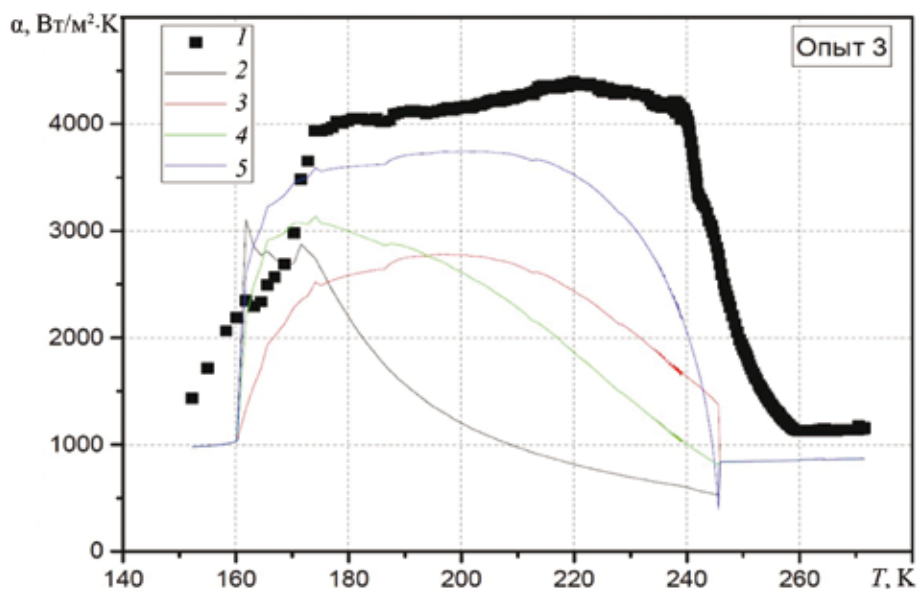


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи в зависимости от средней температуры потока. Опыт 3:
1 — эксперимент [14]; 2 — 5 — расчеты через идеальный КТО с поправочной функцией [10] и по соотношениям [11 —13]

четных значений, полученных по данным подходам, с экспериментальными данными в опытах 1 — 3 в зависимости от средней температуры потока. Из рис. 1 — 3 видно, что значения КТО, полученные с помощью метода Мишра и соотношения Гранрида, имеют лучшее совпадение с экспериментальными значениями по сравнению с результатами, полученными по соотношению Литтла и через идеальный КТО с поправочной функцией.

Помимо зависимости от параметров потока, таких как массовый расход и давление, на значения коэффициента теплоотдачи оказывает сильное влияние

характерный размер канала. Тенденции в изменении коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по методу Мишра и соотношению Гранрида, подобны соответствующим значениям в опытах. Соотношение Литтла дает качественно схожую картину с экспериментальными данными, но абсолютные значения КТО оказываются ниже экспериментальных. Расчет через идеальный КТО с поправочной функцией не показал хорошего совпадения с экспериментальными данными. Эффект многокомпонентности оказывает большее влияние на смеси с большим изменением температуры кипения. У данной смеси разница между температурой

Среднее абсолютное отклонение

Опыт	Среднее абсолютное отклонение AAD, %			
	Идеальный КТО с поправочной функцией	Соотношения Гранрида	Соотношения Литтла	Метод Мишра
1	69,3	34,5	51,0	39,6
2	59,1	22,7	34,8	34,6
3	76,0	46,2	56,2	26,9

начала кипения и точкой росы составила 84 К. Возможно, именно поэтому наблюдается столь большое отклонение расчетных значений КТО.

Проведена оценка среднего абсолютного отклонения (AAD) для полученных значений с целью понимания применимости расчетных соотношений:

$$AAD = \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{экс}} - \alpha_{\text{расч}}|}{\alpha_{\text{экс}}},$$

где $\alpha_{\text{экс}}$, $\alpha_{\text{расч}}$ — экспериментальный и расчетный коэффициенты теплоотдачи.

Сравнение отклонений для всех соотношений представлено в табл. 2. Стоит отметить, что расчеты, выполненные по приведенным соотношениям, имеют большую точность для паросодержаний 0,1...0,75.

Заключение

Представленные соотношения оценены с точки зрения возможности прогнозирования КТО при кипении азеотропных многокомпонентных углеводородных смесей. Расчетные значения КТО сравнивали с доступными экспериментальными данными из литературы.

Поскольку экспериментальные данные доступны только для трех опытов, в которых использованы смеси одинакового состава с одинаковыми рабочими давлениями и массовыми расходами, то было бы некорректно делать окончательный вывод о применимости соотношений. Проведенный анализ — лишь шаг по направлению к детальному пониманию применимости соотношений для многокомпонентных смесей. Необходимы более полные экспериментальные данные, полученные для одного и того же состава при различных условиях, чтобы понять влияние каждого параметра на КТО, знание которого будет очень полезно при проектировании теплообменников для холодильных машин, работающих на смесевом хладагенте.

Литература

1. Лунин А.И., Могорычный В.И., Коваленко В.Н. Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике. М.: Изд. дом МЭИ, 2009.
2. Боярский М.Ю., Лунин А.И., Могорычный В.И. Характеристики криогенных систем при работе на смесях. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

3. Боярский М.Ю. Основы расчета фазовых равновесий в многокомпонентных системах. М.: Изд-во МЭИ, 1984.

4. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981.

6. Кириллин В.А. Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Изд. дом МЭИ, 2008.

7. Баттерворс Д., Хьюитт Г. Теплопередача в двухфазном потоке. М.: Энергия, 1980.

8. Nellis G., Hughes C., Pfotenhauer J. Heat Transfer Coefficient Measurements for Mixed Gas Working Fluids at Cryogenic Temperatures // *Cryogenics*. 2005. V. 45. Pp. 546—556.

9. Baek S., Lee C., Jeong S. Investigation of Two-phase Heat Transfer Coefficients of Argon-Freon Cryogenic Mixed Refrigerants // *Cryogenics*. 2014. V. 64. P. 29—39.

10. Fujita Y., Bai Q. Bubble Dynamics and Heat Transfer in Mixture Boiling // *Proc. 12th Intern. Heat Transfer Conf. Grenoble (France)*, 2002.

11. Granryd E. Heat Transfer in Flow Evaporation of Non Azeotropic Refrigerant Mixtures — a theoretical approach // *Proc. 18th Intern. Congr. Refrig. Canada*, 1991.

12. Little W.A. Heat Transfer Efficiency of Kleemenko Cycle Heat Exchangers // *AIP Conf. Proc. USA*, 2008.

13. Mishra M.P., Varma H.K., Sharma C.P. Heat Transfer Coefficients in Forced Convection Evaporation of Refrigerants Mixtures // *Let. Heat Mass Transf.* 1981. V. 8. Pp. 127—136.

14. Barraza R., Nellis G. Measured and Predicted Heat Transfer Coefficients for Boiling Zeotropic Mixed Refrigerants in Horizontal Tubes // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 2016. V. 97. Pp. 683—695.

References

1. Lunin A.I., Mogorychnyy V.I., Kovalenko V.N. *Primenenie Mnogokomponentnyh Rabochih Tel v Nizkotemperaturnoy Tekhnike*. M.: Izd. dom MPEI, 2009. (in Russian).
2. Boyarskiy M.Yu., Lunin A.I., Mogorychnyy V.I. *Harakteristiki Kriogennyh Sistem pri Rabote na Smesyah*. M.: Izd-vo MPEI, 1990. (in Russian).
3. Boyarskiy M.Yu. *Osnovy Rascheta Fazovyh Ravnovesiy v Mnogokomponentnyh Sistemah*. M.: Izd-vo MPEI, 1984. (in Russian).

4. **Labuntsov D.A., Yagov V.V.** Mekhanika Dvuhfaznyh Sistem. M.: Izd. Dom MPEI, 2007. (in Russian).

5. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** Teploperedacha. M.: Energoatomizdat, 1981. (in Russian).

6. **Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E.** Tekhnicheskaya Termodinamika. M.: Izd. Dom MPEI, 2008. (in Russian).

7. **Battervors D., H'yuit G.** Teploperedacha v Dvuhfaznom Potoke. M.: Energiya, 1980. (in Russian).

8. **Nellis G., Hughes C., Pfothenhauer J.** Heat Transfer Coefficient Measurements for Mixed Gas Working Fluids at Cryogenic Temperatures. *Cryogenics*. 2005;45:546—556.

9. **Baek S., Lee C., Jeong S.** Investigation of Two-phase Heat Transfer Coefficients of Argon-Freon Cryogenic Mixed Refrigerants. *Cryogenics*. 2014;64:29—39.

10. **Fujita Y., Bai Q.** Bubble Dynamics and Heat Transfer in Mixture Boiling. Proc. 12th Intern. Heat Transfer Conf. Grenoble (France), 2002.

11. **Granryd E.** Heat Transfer in Flow Evaporation of Non Azeotropic Refrigerant Mixtures – a theoretical approach. Proc. 18th Intern. Congr. Refrig. Canada, 1991.

12. **Little W.A.** Heat Transfer Efficiency of Kleemenko Cycle Heat Exchangers. AIP Conf. Proc. USA, 2008.

13. **Mishra M.P., Varma H.K., Sharma C.P.** Heat Transfer Coefficients in Forced Convection Evaporation of Refrigerants Mixtures. *Lett. Heat Mass Transf.* 1981;8:127—136.

14. **Barraza R., Nellis G.** Measured and Predicted Heat Transfer Coefficients for Boiling Zeotropic Mixed Refrigerants in Horizontal Tubes. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 2016;97:683—695.

Сведения об авторах

Должиков Антон Сергеевич — аспирант кафедры низких температур НИУ «МЭИ», e-mail: DolzhikovAS@mpei.ru

Могорычный Владимир Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур НИУ «МЭИ»

Information about authors

Dolzhikov Anton S. — Ph.D.-student of Low Temperatures Dept., NRU MPEI, e-mail: DolzhikovAS@mpei.ru

Mogorychny Vladimir I. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Low Temperatures Dept., NRU MPEI

Статья поступила в редакцию 14.02.2017