

УДК 536.24
Н 65

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ РАСТВОРА ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ

А. Г. Никулин, асп.;
Ю. В. Семенюк, канд. техн. наук, доц.;
Н. Н. Лукьянов, асп.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования коэффициента теплоотдачи и состава раствора хладагент R11/минеральное компрессорное масло ХМИ Агринол при его кипении в свободном объеме.

Ключевые слова: раствор хладагент/масло, кипение в свободном объеме, коэффициент теплоотдачи.

Анотація. Подано результати експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі та складу розчину холодоагент R11/мінеральне компресорне мастило ХМИ Агринол при його кипінні у вільному об'ємі.

Ключові слова: розчин холодоагент/масло, кипіння у вільному об'ємі, коефіцієнт тепловіддачі.

Abstract. This paper presents the results of the experimental study of the heat transfer coefficient and the composition of the R11 refrigerant / mineral compressor KhMI Agrinol oil solution under its pool boiling.

Keywords: refrigerant/oil solution, pool boiling, heat transfer coefficient.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Наиболее эффективным процессом передачи теплоты в терморегулирующем оборудовании является кипение. В частности, интенсивность кипения рабочих тел определяет эффективность теплообменных аппаратов холодильных машин, тепловых насосов и тепловых труб.

Применительно к пароконпрессорным холодильным машинам важной научной проблемой остается исследование теплоотдачи при кипении растворов хладагент/масло (РХМ). Примеси компрессорного масла в хладагенте оказывают существенное влияние на интенсивность теплообмена. Сложность создания теоретически обоснованных методов расчета коэффициента теплоотдачи при кипении РХМ, которые позволяли бы оценить влияние примесей масла в хладагенте на интенсивность теплоотдачи, обусловлена недостаточной изученностью происходящих при кипении процессов [2–7].

Одним из определяющих шумовых эффектов при экспериментальном исследовании процессов кипения РХМ является изменение состава раствора в зоне кипения по сравнению с его брутто-составом (т. е. средним составом всего раствора, находящегося в измерительной ячейке) и формирование градиента концентрации по высоте измерительной ячейки [5, 6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Как показывают результаты проведенных исследований [8–19], наличие примесей масла в хладагенте может существенно влиять на интенсивность теплообмена при кипении. Так, авторы работы [8] отмечают, что добавление в хладагент R123 2 % мас-

ла приводит к снижению коэффициента теплоотдачи (КТ) на 21 % при его кипении на поверхности гладкой трубки. Снижение коэффициента теплопередачи с увеличением концентрации масла в хладагенте обнаружено в работах [9–11]. Авторы исследований [12–17] обнаружили увеличение КТ при низких концентрациях масла и его уменьшение при более высоких.

Еще более противоречивые результаты получены в работе [18]. Авторы исследовали процесс кипения смеси аммиак/масло в испарителе затопленного типа с постоянной степенью сухости на входе. При температуре насыщения 7,2 °С было обнаружено, что КТ уменьшается при концентрации масла до 5 %, но значительно увеличивается при концентрации от 5 до 10 %. Однако КТ при кипении растворов всегда меньше по сравнению с чистым хладагентом. Следует заметить, что этот эффект не наблюдался при температуре насыщения 23,3 °С. Аналогичная зависимость КТ имела место при степени сухости на входе в испаритель 0,2 и 0,4 и температуре насыщения –9,4 °С. Авторы не дают объяснения полученных эффектов, но одним из возможных объяснений может быть процесс пенообразования при кипении рабочего тела в испарителе.

В работе [19] исследовано влияние масла (3GS) на КТ при кипении в свободном объеме на гладкой трубке при температуре насыщения 20; 4,4 и –5 °С и концентрациях масла в хладагенте R22 составляющих 1,5; 3,6 и 7 %. При температуре кипения 20 °С КТ уменьшался при увеличении концентрации масла. При тепловом потоке 21,1 кВт/м² и концентрациях масла 3,6 и 7 % на 45 и 55 % в хладагенте наблюдалось снижение интенсивности теплообмена по

сравнению с чистым хладагентом. Однако при температуре насыщения $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ влияние примесей масла на КТ было менее выраженным. При концентрации масла в хладагенте менее 2 % авторы не наблюдали существенного снижения КТ. При температуре насыщения рабочего тела $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ эффект смазочного масла на КТ меняется на противоположный. С добавлением масла в рабочее тело (в диапазоне концентраций от 0 до 3 %) КТ был выше, чем у чистого хладагента. Максимальное увеличение КТ (от 20 до 30 %) наблюдалось при концентрации масла около 1,5 %.

Из приведенного обзора следует, что учет влияния примесей масла в хладагенте на процессы кипения является комплексной, недостаточно изученной проблемой, которая требует дальнейших исследований.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – измерение коэффициента теплоотдачи и локальных составов раствора хладагент/масло при кипении в свободном объеме.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Описание экспериментальной установки. На кафедре теплофизики и прикладной экологии Одесской национальной академии пищевых технологий создана экспериментальная установка, которая реализует метод свободной циркуляции вещества по замкнутому контуру. Кипение жидкости происходит в цилиндрической (диаметр – 70 мм, объем – 1 дм^3) измерительной ячейке (бойлере), снабженной боковыми плоскопараллельными кварцевыми окнами, через которые может выполняться кино- и фотосъемка кипящей жидкости. Диаметр смотрового сечения окон составляет 54 мм. Поверхность бойлера теплоизолирована слоем пенополиуретана с эффективной теплопроводностью $0,02\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

При кипении вещества в бойлере пар через лабиринтный сепаратор поступает в конденсатор, где конденсируется на поверхности труб теплообменника, через который прокачивается хладоноситель из вспомогательного термостата. Далее конденсат проходит через обогреваемый участок, где принимает температуру, близкую к температуре кипящей в бойлере жидкости. Разность температур конденсата на входе в бойлер и кипящей жидкости контролируется с помощью дифференциальной термопары. Конденсат в бойлере равномерно распределяется по объему жидкости через коллектор.

Конструкция установки позволяет производить отборы небольших порций жидкости из различных слоев кипящего раствора для последующего анализа их состава. Система отбора представляет собой капилляры с внутренним диаметром 1 мм, соединенные через вентиль с приемными резервуарами (шприцами). Один из этих капилляров установлен на 10 мм ниже поверхности нагрева (уровень $h = -10$), второй – на ее уровне (уровень $h = 0$), третий – на 10 мм выше (уровень $h = +10$). Кроме того, благодаря плоскопа-

раллельному расположению окон и их материалу (оптически однородному кварцевому стеклу) обеспечивается возможность определения состава раствора оптическими методами.

Рабочим участком (поверхностью нагрева) является капилляр с толщиной стенки 0,1 мм, диаметром 2 мм, длиной 730 мм и сопротивлением 0,548 Ом при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Материал капилляра – нержавеющая сталь. Капилляр изогнут в М-образной форме и крепится на фторопластовой подставке. Электрическая мощность, подводимая к рабочему участку от стабилизированного источника питания, определялась компенсационным методом с использованием образцовой катушки сопротивления Р322 класса точности 0,01.

Средняя температура поверхности рабочего участка определялась по сопротивлению внутреннего термометра – протянутой через капилляр электроизолированной платиновой проволоки диаметром 0,1 мм, имеющей сопротивление 9,5 Ом. Сопротивление платиновой проволоки определялось по компенсационному методу с использованием образцовой катушки сопротивления Р321 класса точности 0,01. Питание измерительной цепи осуществлялось с помощью стабилизированного источника питания. Сила тока, проходящего через термометр, не превышала 2,5 мА. Температура кипящей жидкости измерялась медным термометром сопротивления с погрешностью 0,05 К. Давление в ячейке измерялось с помощью пьезоэлектрического преобразователя давления WIKA А-10 с погрешностью не выше 0,25 %. Все измерения электрических величин осуществлялись цифровым мультиметром Rigol 3064.

Методика проведения эксперимента. Перед проведением эксперимента исследуемые образцы подвергались тщательной очистке от растворенных в них газов. Количество заправляемого в измерительную ячейку вещества подбиралось таким образом, чтобы уровень кипящей жидкости был на 15...20 мм выше поверхности нагревателя.

Опыты проводились при постоянной температуре кипения ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при различных тепловых потоках. Температура кипящей жидкости поддерживалась постоянной путем регулирования расхода и температуры хладоносителя, поступающего из вспомогательного термостата в конденсатор. В зависимости от тепловой нагрузки на рабочем участке температуры в бойлере и конденсаторе отличались на 7...20 К.

Получаемые в подобных экспериментах результаты зависят от направления изменения (увеличения или уменьшения) теплового потока. Как было показано в работе [1], при постепенном увеличении теплового потока на начальном (довольно длительном) этапе эксперимента для процесса пузырькового кипения характерна неустойчивость, что приводит к гистерезису кривых кипения, полученных при увеличении и уменьшении теплового потока. В связи с этим для

каждой концентрации опыт начинался с максимальной тепловой нагрузки на рабочем участке, которая затем снижалась с определенным шагом.

При фиксированном тепловом потоке стационарный режим кипения считался достигнутым, после того как в течение 20 мин наблюдалась неизменность температур жидкости, рабочего участка и давления насыщенных паров.

Тепловой поток, подводимый к рабочему участку, определялся по формуле

$$Q = (U_{py} \cdot U_{окс}) / R_{окс},$$

где U_{py} и $U_{окс}$ – падение напряжения на рабочем участке и на образцовой катушке сопротивления, включенной в цепь питания, соответственно; $R_{окс}$ – сопротивление образцовой катушки.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по выражению

$$\alpha = Q / (F \cdot \Delta t),$$

где F – площадь рабочего участка, которая определялась по результатам измерения размеров капилляра с погрешностью 0,2 %; Δt – температурный напор (разность температур рабочего участка и кипящей жидкости).

Температурный напор определялся как разность показаний внутреннего термометра рабочего участка и медного термометра сопротивления с использованием данных, полученных при их совместной градуировке, которая производилась по образцовому термометру сопротивления ПТС-10 с погрешностью измерения температуры не выше 0,02 К.

Анализ состава отобранных в опытах образцов раствора осуществлялся весовым методом – по результатам взвешивания на аналитических весах GR-300 (погрешность единичного взвешивания – 0,5 мг) пустого шприца, шприца с раствором и шприца после удаления из образца РХМ хладагента. Выпаривание хладагента из образца производилось при температуре 80 °С до момента, когда прекращалось изменение массы шприца. Следует отметить, что результаты проведенных контрольных опытов подтвердили надежность такой методики.

Концентрация масла в образцах раствора определялась по формуле

$$X_m = (m_m - m_0) / (m_{рхм} - m_0),$$

где m_0 – масса пустого шприца; $m_{рхм}$ – масса шприца с образцом раствора; m_m – масса шприца после удаления из раствора хладагента.

Проведенный анализ показал, что погрешность определения концентрации не превышает $2 \cdot 10^{-4}$ кг/кг.

Результаты эксперимента. Объектом исследования являлась модельная система – раствор хладагента R11 с минеральным компрессорным маслом ХМИ Агринол. В результате проведенных экспери-

ментов была получена информация о коэффициенте теплоотдачи чистого хладагента R11 и его растворов R11/ХМИ Агринол при температуре кипения 40 °С. Брутто-концентрации масла в исследованных растворах составляли 0,078 и 0,144 кг/кг.

Результаты измерения состава кипящего раствора при различных плотностях теплового потока представлены на рис. 1.

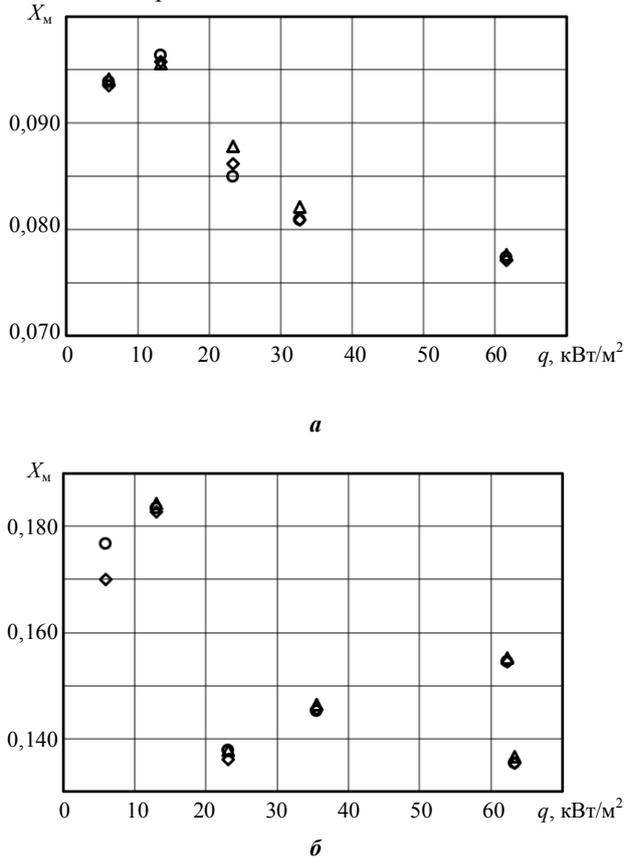


Рис. 1. Состав кипящего раствора R11/ХМИ Агринол при различной плотности теплового потока: **a** – брутто-концентрация $X_m = 0,078$ кг/кг; **б** – брутто-концентрация $X_m = 0,144$ кг/кг; \circ – $h = +10$ мм; Δ – $h = 0$ мм; \diamond – $h = -10$ мм

По оценке авторов, полные погрешности измеренных величин не превышают: для температурного напора – 0,2 К; для плотности теплового потока – 1,5 %; для коэффициента теплоотдачи – 5 %.

Как видно из рис. 1, концентрации масла в кипящем слое и в области, отстоящей на 5...10 мм ниже него, практически совпадают. В то же время состав кипящего раствора существенно изменяется в зависимости от тепловой нагрузки и, соответственно, от режима кипения, а также может значительно отличаться от брутто-состава.

В связи с последним обстоятельством представляется некорректным относить измеряемые характеристики процесса кипения к брутто-концентрации РХМ. Обобщение полученных экспериментальных данных, например построение кривых кипения и зависимостей коэффициента теплоотдачи от плотности

теплового потока для растворов постоянной концентрации (для изоконцентраций), следует производить путем построения поверхностей в координатах $q - \Delta t - X_m$ и $\alpha - q - X_m$, описывающих экспериментальные точки, относящиеся к постоянной температуре кипения, но к различным составам раствора, с последующим расчетом величин при $X_m = \text{const}$.

Поверхность $\alpha - q - X_m$ для изотермы 40 °С представлена на рис. 2.

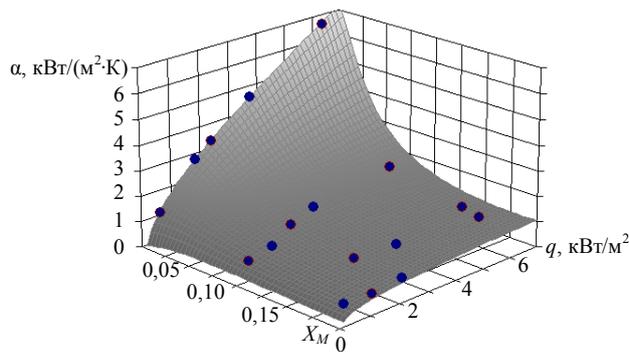


Рис. 2. Обобщение экспериментальных данных о коэффициенте теплоотдачи при кипении растворов R11/ХМИ Агринол (температура кипения 40 °С)

По результатам данной обработки экспериментальной информации были получены представленные на рис. 3 зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, соответствующие постоянным концентрациям кипящего раствора 0,078 и 0,144 кг/кг. На этом же рисунке приведены экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи, отнесенные к брутто-концентрациям исследованных в опытах растворов.

Анализ информации, приведенной на рис. 3, свидетельствует о значительном отклонении значений коэффициента теплоотдачи, отнесенных к брутто-концентрациям, от величин, рассчитанных в соответ-

ствующих сечениях поверхности $\alpha - q - X_m$. Так, в области низких плотностей теплового потока при концентрации $X_m = 0,078$ кг/кг максимальное отклонение составляет 15 %, при концентрации $X_m = 0,144$ кг/кг – 10 %. С повышением плотности теплового потока эти отклонения уменьшаются до 1 %.

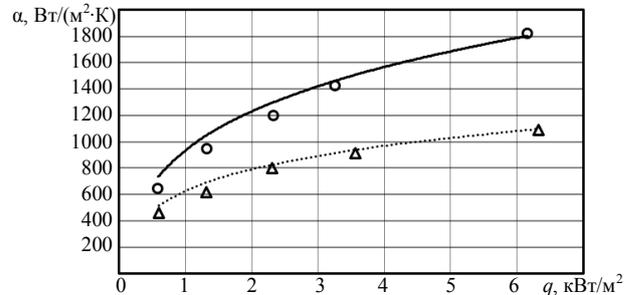


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении растворов R11/ХМИ Агринол (температура кипения 40 °С): ○ – эксперимент (брутто $X_m = 0,078$); △ – эксперимент (брутто $X_m = 0,144$); — – расчет ($X_m = 0,078$); - - - - - расчет ($X_m = 0,144$)

ВЫВОДЫ

1. Получены зависимости коэффициента теплоотдачи при кипении в свободном объеме раствора R11/ХМИ Агринол от плотности теплового потока при концентрациях масла 0,078 и 0,144 кг/кг. При этом концентрации масла в кипящем слое вблизи поверхности нагрева и на расстоянии 5...10 мм ниже него практически совпадают.

2. С увеличением плотности теплового потока концентрация масла в кипящем слое РХМ приближается к брутто-концентрации раствора, что может объясняться интенсивным перемешиванием РХМ в режиме развитого кипения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Нікулін, А. Г. Експериментальне дослідження тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі холодоагентів та їхніх розчинів з компресорними мастилами [Текст] / А. Г. Нікулін, І. В. Олійник, А. В. Мельник // Обладнання та технології харчових виробництв : тем. зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 29. – С. 142–148.

[2] Shen B. A critical review of the influence of lubricants on the heat transfer and pressure drop of refrigerants. Part I: lubricant influence on pool and flow boiling [Text] / B. Shen, E. A. Groll // Int. J. of HVAC&R Research. – 2005. – Vol. 11 (3). – P. 341–355.

[3] Shen B. A critical review of the influence of lubricants on the heat transfer and pressure drop of refrigerants. Part II: lubricant influence on condensation and pressure drop [Text] / B. Shen, E. A. Groll // Int. J. of HVAC&R Research. – 2005. – Vol. 11 (4). – P. 511–526.

[4] Kedzierski, M. A. The effect of lubricant concentration, miscibility, and viscosity on R134a pool boiling [Text] / M. A. Kedzierski // Int. J. of Refrigeration. – 2001. – Vol. 24, nr 4. – P. 348–366.

[5] Kedzierski, M. A. Effect of bulk lubricant concentration on the excess surface density during R123 pool boiling [Text] / M. A. Kedzierski // Int. J. of Refrigeration. – 2002. – Vol. 25 (8). – P. 1062–1071.

[6] Kedzierski, M. A. Use of fluorescence to measure the lubricant excess surface density during pool boiling [Text] / M. A. Kedzierski // Int. J. of Refrigeration. – 2002. – Vol. 25 (8). – P. 1110–1122.

- [7] **Thome, J. R.** Comprehensive Thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricating oil mixtures [Text] / J. R. Thome, D. Phil // Int. J. of HVAC&R Research. – 1995. – Vol. 1 (2). – P. 110–125.
- [8] **Kim, N. H.** Pool Boiling of R-123/oil Mixtures on Enhanced Tubes Having Different Pore Sizes [Text] / N. H. Kim, D. Y. Kim // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – P. 2311–2317.
- [9] **Bell, K. I.** Nucleate Pool Boiling of Refrigerant/oil Mixtures [Text] / K. I. Bell, G. F. Hewitt, S. D. Morris // Experimental Heat Transfer. – 1987. – Vol. 1. – P. 71–86.
- [10] **Chongrungreong, S.** Nucleate Boiling Performance of Refrigerants and Refrigerants-oil Mixtures [Text] / S. Chongrungreong, H. J. Sauer // J. of Heat Transfer. – 1980. – Vol. 102. – P. 701–705.
- [11] **Webb, R. L.** Pool Boiling of R-11 and R-123 Oil-refrigerant Mixtures on Plain and Enhanced Tube Geometries [Text] / R. L. Webb, W. F. McQuade // ASHRAE Transactions. – 1993. – Vol. 99 (1). – P. 1225–1236.
- [12] **Stephan, K.** Heat Transfer in Natural Convective Boiling of Refrigerants and Refrigerant-oil-mixtures in Bundles of T-shaped Finned tubes [Text] / K. Stephan, J. Mitrovic // ASME HTD. – 1981. – Vol. 18. – P. 131–146.
- [13] **Stephan, K.** Heat Transfer in Natural Convective Boiling of Refrigerant–oil Mixtures [Text] / K. Stephan, J. Mitrovic // Proceedings 7th Int. Heat Transfer Conference. – 1982. – Vol. 4 (12). – P. 73–87.
- [14] **Wanniarachchi, A. S.** The Effect of oil Contamination on the Nucleate Pool Boiling Performance of R-114 From a Porous Coated Surface [Text] / A. S. Wanniarachchi, P. J. Marto, J. T. Reilly // ASHRAE Transactions. – 1986. – Vol. 92 (2). – P. 523–538.
- [15] **Wanniarachchi, A. S.** Effect of Oil on Pool Boiling Performance of R-114 from Enhanced Surfaces [Text] / A. S. Wanniarachchi, P. J. Marto, L. M. Sawyer // Proceedings of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference. – 1987. – Vol. 1. – P. 531–538.
- [16] **Memory, S. B.** Nucleate Pool Boiling of R-114 and R-114-oil Mixtures From Smooth and Enhanced Surfaces- I: Single Tubes [Text] / S. B. Memory, D. C. Sugiyama, P. J. Marto // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1995. – Vol. 38. – P. 1347–1361.
- [17] **Memory, S. B.** Nucleate Pool Boiling of R-114 and R-114-oil Mixtures From Smooth and Enhanced Surfaces- II: Tube Bundles [Text] / S. B. Memory, D. C. Sugiyama, P. J. Marto // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1995. – Vol. 38. – P. 1363–1376.
- [18] **Zheng, J.** Boiling of Ammonia/lubricant Mixture on a Horizontal Enhanced Tube in a Flooded Evaporator With Inlet Vapor Quality [Text] / J. Zheng, M. C. Chyu, Z. H. Ayub // Int. J. of Refrigeration. – 2008. – Vol. 3. P. 564–572.
- [19] Some Observations of the Foaming Characteristics in the Nucleate Boiling Performance of Refrigerant-oil Mixtures [Text] / C. C. Wang, H. D. Chong, Y. T. Lin, Y. Z. R. Hu // ASHRAE Transactions. – 1999. – Vol. 105 (1). – P. 469–477.

© А. Г. Нікулін, Ю. В. Семенюк, М. М. Лук'янов
Надійшла до редколегії 12.09.13
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко