

УДК 621.43 + 532.525

ДИНАМИКА РАСПЫЛИВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Драганов Б.Х.¹**, доктор технических наук, **Долинский А.А.²**, академик НАН Украины¹ *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, Киев, 03041, Украина*² *Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Викладено основи розпилювання багатоконпонентних матеріалів. Наведено аналіз і розрахунок розпилювання на основі теорії каскаду. Сформульовано математичну модель та викладено метод розрахунку динаміки розпилювання багатоконпонентних матеріалів.

Изложены основы распыливания многокомпонентных материалов. Приведены анализ и расчет распыливания на основе теории каскада. Сформулирована математическая модель и изложен метод расчета динамики распыливания многокомпонентных материалов.

Bases cutting multicomponent materials. The analysis and calculation of cutting based on the theory stage. The mathematical model and calculation method set out spray dynamics of multicomponent materials.

Библ. 9.

Ключевые слова: распыливание, многокомпонентный материал, теория каскада, мишень, Онсагер, Казимир, принцип Кюри, феноменологический анализ, термодинамическая сила, поток, тензор, симметрия.

Цель исследования - разработать метод исследования распыливания многокомпонентных материалов.

К многокомпонентным материалам относятся сплавы, химические соединения. Основным эффектом при распыливания является то, что частицы отрываются от поверхности нестехиометрические, в результате чего изменяется поверхностная концентрация. Причем ее изменения зависят от массы иона, его энергии, температуры мишени.

Многокомпонентные материалы подвергают распыливанию с целью очистки их поверхности, для напыления тонких пленок сплавов и химических или интерметаллических соединений, в том числе диэлектрических и органических, а также для выявления малораспыливающих материалов, необходимых в экспериментах по исследованию управляемого термоядерного синтеза [1].

Многокомпонентные материалы могут быть разделены на однофазные и многофазные. Однофазные материалы характеризуются всюду одинаковым соотношением компонентов, равномерно распределенных по объему мишени. Они могут быть монокристаллическими, поликристаллическими, аморфными. В поликристаллических однофазных материалах различные зерна могут иметь различную ориентацию, а вблизи границ зерен возможна сегрегация одного из компонентов или примесей.

Многофазные материалы состоят из зерен различного состава, которые могут отличаться и кристаллической структурой. Большинство сплавов, а также смеси различных материалов, таких как прессованные порошки и материалы, представляющие собой однофазную матрицу с выделениями другого соединения, включаются в эту группу. Некоторые сплавы в зависимости от концентрации могут быть и однофазными, и многофазными [1].

Коэффициенты распыливания различных компонен-

тов мишени, вообще говоря, отличаются от коэффициентов распыливания соответствующих однокомпонентных мишеней с той же концентрацией, а полный коэффициент распыливания материала обычно не равен сумме коэффициентов распыливания однокомпонентных мишеней.

Материал и методика исследования. В случае многокомпонентных мишеней приходится вводить несколько различных коэффициентов распыливания.

Полный коэффициент распыливания Y , как и в случае однокомпонентной мишени, является средним числом рассеянных атомов. Приходится на одну первичную (падающую) долю. Учитывается каждый удаленный атом независимо от его массы.

Парциальный коэффициент распыливания Y_i компонента и многокомпонентного материала можно определить как среднее число рассеянных атомов сорта i , приходящийся на один первичный ион.

Таким образом, полный и парциальные коэффициенты распыливания связаны между собой соотношением [2]:

$$Y = \sum_i Y_i. \quad (1)$$

Коэффициент распыливания компонента Y_i^c определяется как парциальный коэффициент распыливания Y_i , разделенный на равновесную поверхностную концентрацию C_i^s компонента и в процессе распыливания:

$$Y_i^c = Y_i / C_i^s. \quad (2)$$

При таком определении в явной форме выделяется тривиальная зависимость парциального коэффициента распыливания от концентрации (т. е. то обстоятельство, что парциальный коэффициент распыливания стремится к нулю, когда к нулю стремится концентрация). Сравнивая коэффициент распыливания компонента с коэффициентом распыливания соответствующей однокомпонентной мишени, можно судить о влиянии матрицы на распыление.

Иногда Y_i^c включает в себя еще и поправки на различие атомных плотностей в сплаве и в чистом компоненте. В литературе парциальным коэффициентом распыления часто называют обе величины Y_i и Y_i^c , но необходимо уточнять, что именно – Y_i^c или Y_i – понимается под парциальным коэффициентом распыления [2].

В равновесном режиме отношение числа распыленных атомов компонента А до величины для компонента В должно быть равным отношению объемных концентраций c_A/c_B :

$$n_A/n_B = c_A/c_B. \quad (3)$$

С учетом того, что по определению коэффициента распыления отношение числа рассеянных атомов n_A/n_B равно отношению парциальных коэффициентов распыления Y_A/Y_B , получаем следующее соотношение между поверхностными концентрациями c_A^s, c_B^s и объемными концентрациями, c_A, c_B для равновесного режима [3]:

$$Y_B^c/Y_B^c = (Y_A/Y_B) (c_B^s/c_B^s). \quad (4)$$

Формула позволяет экспериментально определять соотношения коэффициентов распыления компонентов и их зависимость от концентрации для данной бинарной системы.

Для теоретического исследования применен прямой способ, основанный на интегрировании вдоль траектории движения.

Введем функции [4]:

$$\delta_{ij}(v) = \int dv' dv'' \delta_{ij}(v, v', v''). \quad (5)$$

$$\delta_i(v) = \sum_{j=1}^n \delta_{ij}(v) p_j. \quad (6)$$

$$\sum_i v = n \cdot \delta_i(v). \quad (7)$$

$i, j = 1, \dots, N$,

где $p_i = n_i/n$ концентрация атомов i -го компонента.

Введем также функцию

$$\varphi_i(r, v) = \sum_i v v f_i(r, v). \quad (8)$$

В приближении парных столкновений уравнение для одночастичной функции $f(r, v)$ распределения имеет вид:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} = \int (v_1 - v) \frac{\partial f^2}{\partial R}(r, v, r_1, v_1, t) dr_1 dv_1. \quad (9)$$

где $R = r_1 - r, f(r, v) dr dv$ – число атомов элемента объема фазового пространства координат r и скоростей v .

$f(r, v, r_1, v_1, t)$ – парная функция распределения атомов с координатами r и r_1 . Причем все атомы в веществе считаются неразличимыми, а интегрирование ведется по всему объему V . Полученное уравнение справедливо для любого соотношения пробегов и радиусов атомов. Считается, что характеристики потока первичных частиц, которые генерируют источник первых выбитых атомов каскада, заданы. С учетом усреднения по времени парная функция распределения $f^{(2)}$ определяется таким образом:

$$f^{(2)}(r, v, r_1, v_1, t) dr dv dr_1 dv_1.$$

Есть вероятность того, что в элементе фазового пространства $dr_1 dv_1$ содержится один из атомов мишени, а любой другой находится в элементе фазового пространства $dr_1 dv_1$. Для ограниченной среды поток частиц на границе можно рассчитать, используя для нахождения вблизи границы безграничное приближение и транспортный оператор, учитывающий корреляцию атомов и, следовательно, увеличение в направлении нормали.

Важность распыления, мишеней (сплавов и соединений) обусловлена целым рядом обстоятельств. Во-первых, даже при распылении чистых материалов, как правило, происходит внедрение ионов в мишень, и, вследствие этого, их состав меняется с последующим распылением многокомпонентной мишени; во-вторых, изучение распыления многокомпонентных материалов весьма важно в промышленности, в частности, для технологии производства тонких пленок, различных покрытий, при легировании материалов и так далее. Основная сложность расчета распыления многокомпонентных материалов заключается в том, что в процессе бомбардировки мишени состав ее все время меняется за счет каскадного перемешивания, имплантации, диффузии, преимущественного распыления и других процессов. Поэтому задачу теоретического описания распыления принято разделять на две части: расчет распыления многокомпонентного материала заданного состава и учет изменений, происходящих в мишени за счет бомбардировки в процессе распыления (вторичные эффекты) [5].

Поверхностный слой, из которого при распылении вылетают атомы (около 5...10 А) формируется за счет всех возможных процессов переноса материала. Этот поверхностный слой имеет выраженный дополнительный градиент концентрации, происхождение которого может быть связано с преимущественным распылением, сегрегацией, радиационно-ускоренной диффузией. Распыление жидкости в виде струи производится различными способами, в том числе форсунками [6]. Выполним анализ динамики плоскостных многокомпонентных сред.

В основе описания методами динамики сплошных гетерогенных сред следует исходить из представления о взаимнопроницаемом движении компонентов смеси, занимающих один и тот же объем. Подобный континуум представляет собой совокупность N континуумов, каждый из которых относится к своей составляющей (фазе или компоненту) смеси и заполняет один и тот же объем, занятый смесью. Для каждого из этих составляющих континуума в каждой точке определяется обычным образом плотность (приведенная) ρ_i (масса i -й составляющей в единице объема среды), скорость ($i = 1, 2, \dots, N$), а затем и другие параметры, относящиеся к своему континууму и своей составляющей смеси. Таким образом, в каждой точке объема, занятого смесью, будут определены N плотности ρ_i , N скоростей v_i и т.д.

Кроме того, исходя из этих величин, можно определить параметры, характеризующие смесь в целом, а именно: плотность смеси и среднее массовой (барицен-

трической) скорости смеси:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i, \rho v = \sum_{i=1}^N \rho_i v_i. \quad (10)$$

Иногда удобно пользоваться скоростями, которые называют диффузионными, представляющие скорости движения составляющих относительно центра масс смеси или среды в целом:

$$w_i = v_i - v, \sum_{i=1}^N \rho_i w_i = 0. \quad (11)$$

В этих уравнениях приняты обозначения: N общее число фаз; ρ_i – плотность компонента; v – вектор массовой скорости; w_i – приведенная скорость, м/с.

Сформулированные задачи целесообразно решать методами неравновесной термодинамики [7].

В качестве определяющих (реологических) соотношений, которые дополняют систему уравнений, основанных на процессах химического обмена, применяют феноменологические соотношения необоротных процессов (соотношение Онсагера) [8].

$$I_k = \sum_{k=1}^N L_{kl} X_l; (k=1,2,\dots,N), \quad (12)$$

где N – число независимых физических процессов; L_{kl} – матрица феноменологических (кинетических) коэффициентов, связывающая между собой потоки и термодинамические силы X_l .

Потоки и термодинамические силы есть, в общем случае, тензорными величинами любого ранга. Физический смысл кинетических коэффициентов может быть выяснен в рамках молекулярно-кинетической теории. Число отличных от кинетических коэффициентов в (12) ограничивается принципом Кюри [9], согласно которому компоненты (имеются в виду составляющие векторов вдоль осей координат) потоков будут зависеть не от всех компонентов термодинамических сил. Так, например, в случае изолированной системы процессы различной тензорной размерности не взаимодействуют друг с другом. Кроме того, в рамках соотношений Онсагера принимаются в качестве независимого постулата соотношения симметрии Онсагера-Казимира – так называемый принцип взаимности [3]:

$$L_{kl} = (B, \Omega) = \varepsilon_k \varepsilon_l L_{lk} (-B, -\Omega). \quad (13)$$

Здесь B – магнитная индукция, Ω – угловая скорость вращения системы, $\varepsilon_k = 1$ для четных (энергия, концентрация) и $\varepsilon_l = -1$ для нечетных (плотность импульса) макроскопических параметров (четных или нечетных функций скоростей частиц). В отсутствие внешнего магнитного поля соотношение симметрии (13) для изотропного поля приобретает более простой вид:

$$L_{kl} = L_{lk}, \quad (14)$$

где L_{jk} – скалярные величины.

Согласно основным постулатам термодинамики необратимых процессов, в состояниях, близких к состоянию термодинамического равновесия, термодинамические потоки можно представить в виде линейных функций от термодинамических сил [10]:

$$I_{qj} = L_{00}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta}^{jk} X_{\beta k}; \quad (15)$$

$$I_{\alpha j} = L_{\alpha 0}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta}^{jk} X_{\beta k}.$$

Кинетические коэффициенты $L_{\alpha\beta}^{jk} (\alpha, \beta = 0, 1, \dots, N)$ представляют собой тензоры, зависящие от переменных состояния и параметров, характеризующих геометрическую симметрию среды. Согласно общей теории тензорных функций свойства симметрии изотропных сред вполне характеризуются метрическим тензором q^{jk} . Все тензоры будут тензорными функциями только метрического тензора:

$$L_{\alpha\beta}^{jk} = L_{\alpha\beta} q^{jk}, \quad (16)$$

где $q^{(jk)}$ – скалярные величины.

В прямоугольной системе координат определяемые соотношения примут вид:

$$I_{qj} = L_{00}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta} X_{\beta j}; \quad (17)$$

$$I_{\alpha j} = L_{\alpha 0}^{jk} X_{0k} - \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta} X_{\beta j}.$$

Из условия симметрии Онсагера-Казимира следует

$$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha} (\alpha, \beta = 0, 1, \dots, N), \quad (18)$$

что уменьшает число феноменологических коэффициентов.

Для турбулентных многокомпонентных смесей запишем соотношение термодинамических сил через потоки I_{qj}^T и $I_{\alpha j}^T (\alpha = 0, 1, \dots, N)$:

$$I_{qj}^T - L_{00}^T X_{0j}^T = \sum_{\beta=1}^N L_{0\beta}^T \left[X_{\beta j}^T - \frac{M_\beta}{M_N} X_{Nj}^T \right]; \quad (19)$$

$$I_{\alpha j}^T - L_{\alpha 0}^T X_{0j}^T = \sum_{\beta=1}^N L_{\alpha\beta}^T \left[X_{\beta j}^T - \frac{M_\beta}{M_N} X_{Nj}^T \right]. \quad (20)$$

Здесь $L_{\beta j}^T (\beta = 0, 1, \dots, N)$ – термодинамические силы, которые определяются выражением

$$L_{\beta j}^T = -(\bar{P}/\bar{\rho}_\beta) d_{\beta j}^T I \sum_{\beta=1}^N \bar{Z}_\beta L_{\beta j}^T = 0, \quad (21)$$

где $\bar{\rho}_\beta (r, t)$ – среднее значение плотности (на единицу объема) молекул компонента β ; $d_{\beta j}^T$ – линейно зависящие векторы процесса ($\sum_{\beta=1}^N d_{\beta j}^T = 0$).

Следует подчеркнуть, что при анализе гидродинамических и тепломассовых процессов феноменологический подход позволяет получить определяющее соотношение для термодинамических потоков диффузии и тепла, а также удобные для расчета алгебраические формулы, связывающие между собой коэффициенты молекулярного процесса.

Выводы

Анализ процесса распыления многокомпонентных материалов на основе метода теории каскадов позволяет получить достоверную и надежную информацию об изучаемых явлениях.

Исследование закономерности распыления частей многокомпонентных материалов рекомендуется учредить на методе моделирования динамики гетерогенных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berish R* (ed) Sputtering by Particle Bombardment. I. Topics Appl. Phys. Vd 47 Springer, Berlin 1981
2. *Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел.* Е. С. Молчанова. – М. Мир, 1989. – 448 с
3. *Zigmund P.* Proc of the «Fourth International Conference Secondary Ion/Mass Spectrometry, SIMS–IV, Part. Stringer–Verlay, Berlin, Heidelberg. New-York – 1984 – P.2 .. 27.
4. *Плетнев В.В.* Современное состояние теории физического распыления неупорядоченных материалов. // В кн: Итоги науки и техники. Пучки заряженных частиц и твердое тело. Том 5.5 Винити 1981– с.4 – 62.
5. *Исихара А.* Статическая физика – М.: Мир, 1973 – 471с.
6. *Бородин В. А.* Распыление жидкостей / В.А.Бородин, Ю.Ф.Детяткин, Л. А. Клячко, Я. И. Ягодкин //М.: Машиностроение, 1967 – 264 с.
7. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. – М. 1960.
8. *Onsager L.* Reciprecal relations in invisible processes // Chem. Rev. – 1931. – № 37 – P.405–426.
9. *Prigogine I., Kondepudi F.* Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. – New-York: John Wiley & Sons, 1 Edition, 1998. – 508 p.
10. *Долинский А. А.* Гидродинамика техногенных выбросов в окружающую среду / А.А. Долинский, Б.Х. Драганов // Киев: ИТТФ – 2015 – 106 с.

DYNAMICS OF SPRAYING MULTICOMPONENT MATERIALS

B.Kh.Draganov, A.A.Dolinsky

¹National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, 15, Goroev Oborony str., Kiev, 03041, Ukraine

²Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kiev, 03680, Ukraine

Bases cutting multicomponent materials. The analysis and calculation of cutting based on the theory stage. The mathematical model and calculation method set out spray dynamics of multicomponent materials.

Analysis of the process of sputtering multicomponent materials on the basis of the cascade theory method allows one to obtain reliable and reliable information about the phenomena studied.

Investigation of the pattern of atomization of parts of multicomponent materials is recommended to be established on the method of modeling the dynamics of heterogeneous media.

Ref. 9.

Key words: multi-material cutting theory stage, mishent, Onzacher, Kazimierz, the principle Curie phenomenological analysis, thermodynamic power flux tensor simpetriya.

1. *Berish R.* (ed) Sputtering by Particle Bombardement. I. Topics Appl. Phys. Vd 47 Springer, Berlin 1981.
2. *Molchanova E.* Fundamental and applied aspects of sputtering of solids. Moskva: Mir, 1989. 448 p. (Rus)
3. *Zigmund .* Proc of the «Fourth International Conference Secondary Ion / Mass Spectrometry, SIMS - IV, Part. Stringer-Verlay, Berlin, Heidelberg. New-York. 1984. P.2 .. 27.
4. *Pletniov V.* The current state of the theory of physical dispersion of disordered materials. Itogi nauki I tehniki. Tom 5.5. Viniti. 1981. P.4-62. (Rus).
5. *Isihara A.* Static physics// Moskva: Mir, 1973. 471p. (Rus).
6. *Borodin V.* Spraying of liquids/ Borodin V., Detiatkin Y., Kliachko L, Jagodkin J. Moskva: Mashynostrojenije-1967. 264p. (Rus).
7. *Prigogyne I.* Introduction to the thermodynamics of irreversible processes. M .1960. (Rus).
8. *Onsager L.* Reciprocal relations in invisible processes // Chem. Rev. 1931. № 37. P. 405-426
9. *Prigogyne I., Kondepudi F.* Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. NewYork: John Wiley & Sons, 1 Edition, 1998. 508 p.
10. *Dolinsky A.* Hydrodynamics of technogenic emissions into the environment / Dolinsky A, Draganov B. Kyiv, ITTF. 2015. 106 p.(Rus).

Получено 17.11.2017

Received 17.11.2017

УДК 536.248.2:620.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НАНОЧАСТИЦ TiO_2 НА ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА R141b В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ

Хлиева О.Я.¹, Гордейчук Т.В.¹, Никулин А.Г.², Лукьянов Н.Н.¹, Железный В.П.¹¹Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, Украина²Высший технический институт, Лиссабон, Португалия

Наведено результати експериментального дослідження впливу добавок наночастинок TiO_2 (0,1 % мас.) і ПАВ Span80 (0,1 % мас.) в хладагенте R141b на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі в інтервалі густин теплового потоку від 5 до 70 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ і значеннях тиску 0,2, 0,3 і 0,4 МПа.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния добавок наночастиц TiO_2 (0,1 % масс.) и ПАВ Span80 (0,1 % масс.) в хладагенте R141b на коэффициент теплоотдачи при кипении в свободном объеме в интервале плотностей теплового потока от 5 до 70 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ и давлениях 0,2, 0,3 и 0,4 МПа.

The results of experimental study of effect of TiO_2 nanoparticles (0.1 % mass.) and surfactant Span80 (0.1 % mass.) additives in refrigerant R141b on the heat transfer coefficient of nucleate pool boiling process at three values of pressure 0.2, 0.3 and 0.4 MPa and range of heat flux from 5 to 70 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ are presented in paper.

Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: наноплюиды, кипение в свободном объеме, коэффициент теплоотдачи, эксперимент. A и B – эмпирические коэффициенты; F – площадь рабочего участка, m^2 ; q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; Q – тепловой потока, Вт ; R – электросопротивление, Ом ; U – падение напряжения, В ; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$; Δt – разность температур рабочего участка и кипящей жидкости, К ;

КТО – коэффициент теплоотдачи;

ПАВ – поверхностно-активное вещество;

ОКС – образцовая катушка сопротивления;

РУ – рабочий участок.

1. Введение

Последние годы все активнее исследуются перспективы использования наноплюидов для повышения энергетической эффективности холодильных систем [1]. Применительно к холодильному оборудованию интерес представляют рабочие тела пароконденсационных машин (галогензамещенные углеводороды) с добавками наночастиц. По сравнению с традиционными рабочими телами, наноплюиды (коллоидные системы, состоящие из базовой жидкости и наночастиц с характерным размером 1-100 нм) отличаются улучшенными теплофизическими свойствами (прежде всего теплопроводностью). Изменение теплофизических свойств базовых жидкостей с добавками наночастиц, как правило, обеспечивает более высокие значения коэффициентов теплоотдачи как при вынужденной конвекции, так и при кипении [1-6]. Кроме того, добавки наночастиц в рабочие тела пароконденсационных холодильных машин способствуют повышению их энергетической эффективности [1, 7]. Следует констатировать, что исследований, посвященных процессу кипения нанохладагентов как в свободном объеме, так и в процессе течения в трубках теплообменного оборудования немного [2-6], что не позволяет сделать однозначный вывод о влиянии добавок наночастиц на КТО. В некоторых работах показано однозначное увеличение КТО при кипении хладагентов с добавками наночастиц [2, 4, 5]. Причем вклад

в увеличение КТО от добавок наночастиц различен: от значений, сопоставимых с неопределенностью измерения КТО, до почти двукратного его увеличения [5]. В то же время есть работы [3], в которых отмечается снижение КТО при кипении хладагентов с добавками наночастиц. В работе [6] отмечается, что эффект от добавок наночастиц сопоставим с эффектом от добавок ПАВ, которое обеспечивает стабильность исследуемого наноплюида. Кроме того, в работе [6], показано, что коэффициент теплоотдачи при кипении чистого базового вещества на поверхности с осевшими наночастицами выше, чем при кипении наноплюида на чистой поверхности. Все вышесказанное определяет актуальность исследования, посвященного экспериментальной оценке КТО при кипении рабочего тела пароконденсационных холодильных машин с добавками наночастиц.

2. Объекты исследования

В представленном исследовании в качестве базовой жидкости для приготовления наноплюида был выбран хладагент R141b. В качестве добавок использовались наночастицы TiO_2 с размером в порошке менее 25 нм (CAS № 1317-70-0, Sigma-Aldrich). Приготовить агрегативно устойчивую систему R141b/наночастицы TiO_2 без использования ПАВ не удалось. Для обеспечения устойчивости наноплюида были проведены дополнительные исследования по выбору типа и концентрации ПАВ [8], в которых было показано, что для приготовления объ-

ектов исследования целесообразно использовать ПАВ Span80 (CAS № 57-09-0, Sigma-Aldrich). Хладагент R141b был выбран как удобная для проведения экспериментальных исследований КТО исследования модельная система, которая имеет низкое давление насыщенных паров при температуре окружающей среды. Вместе с тем, эффекты, полученные при исследовании КТО модельной системы R141b/наночастицы могут быть распространены на широко используемые на практике хладагенты (R134a, R410A и др.), которые относятся к той же группе галогензамещенных углеводородов, что и R141b.

Для приготовления нанофлюида использовался двухступенчатый метод, в соответствии с которым наночастицы в виде порошка смешивались с хладагентом и полученная смесь подвергалась последовательно ультразвуковому (30 минут), механическому (12 часов) и снова ультразвуковому (30 минут) диспергированию. Процесс механического диспергирования осуществлялся в бисерной мельнице, заполненной шариками из ZrO_2 диаметром 2 мм. Ультразвуковая обработка проводилась в ультразвуковой ванне Codison CD 4800 (частота 42 кГц, мощность 0,07 кВт). Проведенные исследования показали, что полученный по изложенной технологии нанофлюид был агрегативно стабильным в течение трех месяцев после его приготовления.

Очевидно, что на процесс кипения могут оказывать влияния не только добавки наночастиц, но и ПАВ. Поэтому в качестве объектов исследования использовались: чистый хладагент – R141b; раствор хладагента с ПАВ Span80 (0.1 % масс.) – R141b/ПАВ; нанофлюид, состоящий из хладагента R141b, ПАВ Span80 (0.1 % масс.) и наночастиц TiO_2 (0.1 % масс.) – R141b/ПАВ/ TiO_2 .

3. Методика проведения эксперимента

Описание и принцип работы экспериментальной установки для исследования процессов кипения в свободном объеме достаточно подробно изложены в [9]. Рабочим участком являлся капилляр из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,1 мм, диаметром 2 мм, длиной 730 мм. Средняя температура поверхности рабочего участка определялась по сопротивлению внутреннего термометра – протянутой через капилляр электроизолированной платиновой проволоки диаметром 0,1 мм с суммарной стандартной неопределенностью не более 0,05 К. Температура кипящей жидкости измерялась медным термометром сопротивления с суммарной стандартной неопределенностью не более 0,05 К. Давление измерялось с помощью пьезоэлектрического преобразователя давления с суммарной стандартной неопределенностью не более 0,30 %. Все электрические измерения осуществлялись цифровым мультиметром Rigol 3064. При измерении КТО эксперименты начинались с максимальной тепловой нагрузки на рабочем участке, которая затем снижалась с определенным шагом.

Тепловой поток, подводимый к рабочему участку, определялся по формуле

$$Q = (U_{PV} \cdot U_{OKC}) / R_{OKC} \quad (1)$$

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле

$$\alpha = Q / (F \cdot \Delta t). \quad (2)$$

Расширенная неопределенность измерения теплового потока Q и коэффициента теплоотдачи α оценивалась по методике [10] для доверительной вероятности 0,95.

4. Результаты экспериментального исследования КТО

Экспериментальное измерение плотности теплового потока, степени перегрева и коэффициента теплоотдачи при кипении объектов исследования проводилось при трех значениях температуры насыщения: 77,9 °С, 67,1 °С, 52,9 °С. Этим значениям температуры соответствовали давления насыщения чистого R141b: 0,10 МПа, 0,20 МПа, 0,30 МПа. Кроме того, в эксперименте варьировались значения плотности теплового потока в интервале от 5,8 до 56,5 кВт/м².

Результаты исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для разных давлений приведены на рисунках 1,а, 1,б и 1,в. Кроме того, на этих рисунках приведены значения расширенных неопределенностей соответствующих величин для каждой экспериментальной точки. После аппроксимации полученных экспериментальных данных зависимостью вида было рассчитано отношение КТО для R141b/ПАВ/ TiO_2 к КТО для чистого R141b – рис. 1,г.

5. Анализ результатов экспериментального исследования КТО

Выполненный анализ полученных экспериментальных данных показывает, что добавки 0,1 % масс. ПАВ Span-80 в R141b приводят к небольшому увеличению КТО при кипении в свободном объеме при низких плотностях теплового потока. Напротив, при увеличении плотности теплового потока наблюдается уменьшение КТО. Примеси наночастиц TiO_2 в растворе R141b/ПАВ способствуют небольшому увеличению КТО. Полученные экспериментальные данные указывают на зависимость увеличения КТО при введении в R141b наночастиц TiO_2 и ПАВ от плотности теплового потока и от давления насыщенных паров. С увеличением плотности теплового потока вклад наночастиц TiO_2 и ПАВ в рост КТО понижается. Наибольший эффект от добавок наночастиц TiO_2 и ПАВ в рост КТО наблюдается при низких давлениях. В целом можно констатировать, что, эффект от добавок наночастиц и ПАВ не является однозначным и сильно зависит от параметров проведения эксперимента.

Следует заметить, что именно низкие значения давления насыщенных паров и низкие значения плотностей теплового потока характерны для испарителей пароконденсационных холодильных машин и тепловых насосов, поэтому при реальных параметрах работы холодильного оборудования влияние добавок наночастиц на КТО при кипении будет существенным.

Для детального анализа влияния различных факторов на КТО при кипении нанофлюидов на основе гало-

идозамещенных углеводородов в дальнейшем планируется экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц и ПАВ на их теплофизические свойства, а так же на внутренние характеристики процесса кипения в свободном объеме. Данная информация позволит разделить влияние на КТО при кипении нанофлюидов различных факторов, таких как изменения теплофизических

свойств, оседание наночастиц на поверхности нагревателя, изменение краевого угла смачивания и т.п. Данная информация позволит прогнозировать эффекты от добавок наночастиц в рабочие тела пароконденсационных холодильных машин и оценивать целесообразность использования нанохладагентов в оборудовании при различных рабочих параметрах.

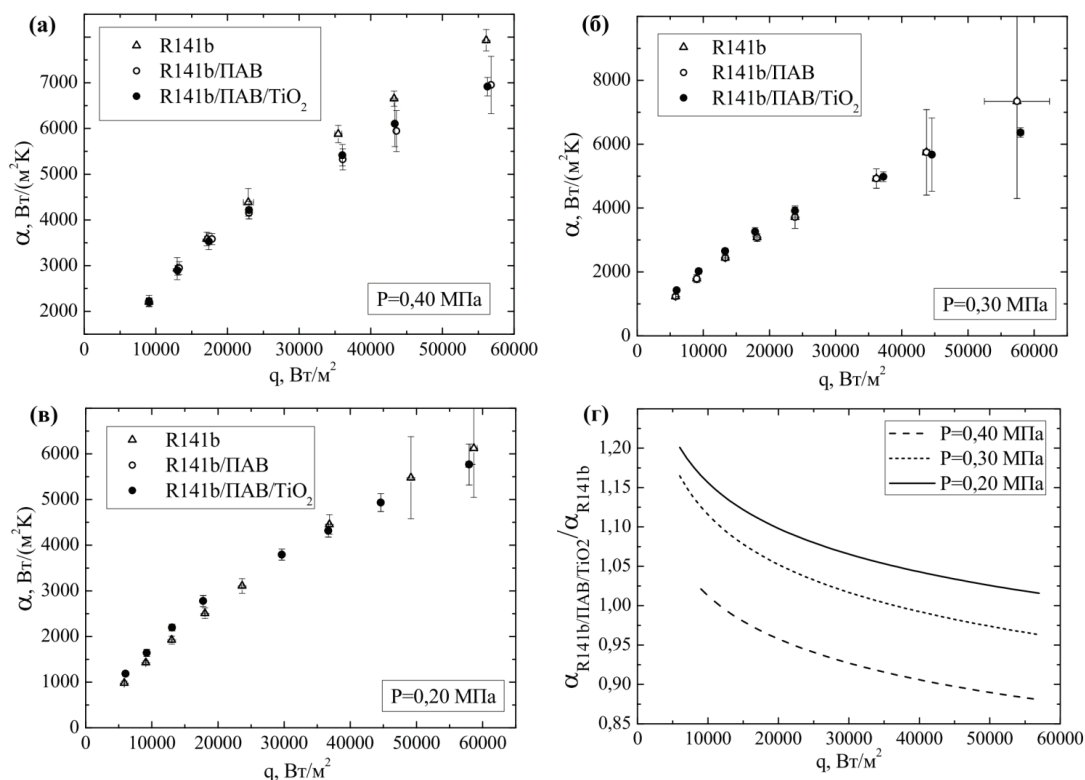


Рис. 1. Экспериментальные значения КТО при кипении в свободном объеме для R141b/ПАВ и R141b/ПАВ/TiO₂ в сравнении с чистым R141b: (а) 0,40-МПа, (б) 0,3-МПа, (в) 0,2-МПа, а так же отношение КТО для R141b/ПАВ/TiO₂ к КТО для R141b в зависимости от плотности теплового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Celen A., Çebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S. A review of nanorefrigerants: flow characteristics and applications //International Journal of Refrigeration. – 2014. – Vol. 44. – P. 125-140.
2. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2011. – Vol. 35, №. 6. – P. 960-970.
3. Trisaksri V., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52, №. 5. – P. 1582-1588.
4. Tazarv S., Saffar-Avval M., Khalvati F., Mirzaee E. Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer to TiO₂/R141b Nanorefrigerant //Experimental Heat Transfer. – 2016. – Vol. 29, №. 2. – P. 188-204.
5. Eid E. I., Khalaf-Allah R. A., Taher S. H., Al-Nagdy A. A. An experimental investigation of the effect of the addition of nano aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134a //Heat and Mass Transfer. – 2017. – doi:10.1007/s00231-017-2010-y

6. Diao Y. H., Li C. Z., Zhao Y. H., Liu Y., Wang S. Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 89. – P. 110-115.

7. Лукьянов Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенов Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 3, № 5 (75). – С. 32-40.

8. Железный В.П., Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В. Исследование технологий приготовления нанохладагентов с улучшенными теплофизическими свойствами // Казахстан-Холод 2017: Сбор. докл. IV между. науч.-техн. конф. (15-16 марта 2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – С. 241-250.

9. Nikulin A., Melnyk A., Semenyuk Y., Lukianov M., Zhelezny V. Effect Of Nanoparticles On Pool Boiling Characteristics, International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer (CONV-14 ICHMT), Kusadasi,

Turkey, 2014.

10. *Guide to the Expression of Uncertainty in*

Measurement: First edition. - ISO, Switzerland, 1993

An experimental study of the effect of surfactant and TiO₂ nanoparticles additives in R141b on the nucleate pool boiling process

Khliyeva O.¹, Gordeychuk T.¹, Nikulin A.², Lukianov N.¹, Zhelezny V.¹

¹Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa, Kanatnaya str., 112

²Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, IN+, Portugal, Lisbon, Av. Rovisco Pais 1

The results of experimental study of effect of TiO₂ nanoparticles (0.1 % mass.) and surfactant Span80 (0.1 % mass.) additives in refrigerant R141b on the heat transfer coefficient of nucleate pool boiling process at pressures 0.2, 0.3 and 0.4 MPa and range of heat flux from 5 to 70 kW·m⁻² are pre-sented. Additives of TiO₂ nanoparticles and surfactant lead to an increase in heat transfer coefficient during pool boiling at low heat flux and to a decrease in heat transfer coefficient at high heat flux. The low heat fluxes and pressures are typical for evaporators of refrigerating machines that the nanoparticle additives to refrigerant could lead to positive effect on heat transfer coefficient during pool boiling. References 10, tables 0, figures 1.

Key words: nanofluids, pool boiling, heat transfer coefficient, experiment

1. *Celen A., Çebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S.* A review of nanorefrigerants: flow characteristics and applications, *International Journal of Refrigeration*, 2014, Vol. 44, P. 125-140.

2. *Peng H., Ding G., Hu H.* Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, Vol. 35, №. 6, P. 960-970.

3. *Trisaksri V., Wongwises S.* Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids, *International Journal of*

Heat and Mass Transfer, 2009, Vol. 52, №. 5, P. 1582-1588.

4. *Tazarv S., Saffar-Avval M., Khalvati F., Mirzaee E.* Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer to TiO₂/R141b Nanorefrigerant // *Experimental Heat Transfer*, 2016, Vol. 29, №. 2, P. 188-204.

5. *Eid E. I., Khalaf-Allah R. A., Taher S. H., Al-Nagdy A. A.* An experimental investigation of the effect of the addition of nano aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134a, *Heat and Mass Transfer*, 2017, doi:10.1007/s00231-017-2010-y

6. *Diao Y. H., Li C. Z., Zhao Y. H., Liu Y., Wang S.* Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 89, P. 110-115.

7. *Lukianov M., Khliyeva O., Zhelezny V., Semenyuk Y.* Nanorefrigerants application possibilities study to increase the equipment ecological-energy efficiency, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 3, №. 5 (75), P. 32-40.

8. *Zhelezny V., Khliyeva O., Gordeychuk T.* The study of the technology of nanocoolants and nanorefrigerants preparation with improved thermophysical properties, *Proceedings of the VII Intern. Scientific and Technical Conf. «KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»*, March 15-16, 2017, P. 241-250. (Rus.)

9. *Nikulin A., Melnyk A., Semenyuk Y., Lukianov M., Zhelezny V.* Effect Of Nanoparticles On Pool Boiling Characteristics, *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer (CONV-14 ICHMT)*, Kusadasi, Turkey, 2014.

10. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. - ISO, Switzerland, 1993.*

Получено 17.10.2017

Received 17.10.2017