

УДК 536.248.2:620.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НАНОЧАСТИЦ $\text{TiO}_2$ НА ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА R141b В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ

Хлиева О.Я.<sup>1</sup>, Гордейчук Т.В.<sup>1</sup>, Никулин А.Г.<sup>2</sup>, Лукьянов Н.Н.<sup>1</sup>, Железный В.П.<sup>1</sup><sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, Украина<sup>2</sup> Высший технический институт, Лиссабон, Португалия

Наведено результати експериментального дослідження впливу добавок наночастинок  $\text{TiO}_2$  (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  $\text{TiO}_2$  (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  $\text{TiO}_2$  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:** нанофлюиды, кипение в свободном объеме, коэффициент теплоотдачи, эксперимент. $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты; $F$  – площадь рабочего участка,  $\text{m}^2$ ; $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ; $Q$  – тепловой потока,  $\text{Вт}$ ; $R$  – электросопротивление,  $\text{Ом}$ ; $U$  – падение напряжения,  $\text{В}$ ; $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}^{-1}$ ; $\Delta t$  – разность температур рабочего участка и кипящей жидкости,  $\text{К}$ ;

КТО – коэффициент теплоотдачи;

ПАВ – поверхностно-активное вещество;

ОКС – образцовая катушка сопротивления;

РУ – рабочий участок.

### 1. Введение

Последние годы все активнее исследуются перспективы использования нанофлюидов 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, нанофлюиды (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 нанофлюида. Кроме того, в работе [6], показано, что коэффициент теплоотдачи при кипении чистого базового вещества на поверхности с осевшими наночастицами выше, чем при кипении нанофлюида 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 нанофлюида был выбран хладагент R141b. В качестве добавок использовались наночастицы  $\text{TiO}_2$  с размером в порошке менее 25 нм (CAS № 1317-70-0, Sigma-Aldrich). Приготовить агрегативно устойчивую систему R141b/наночастицы  $\text{TiO}_2$  без использования ПАВ не удалось. Для обеспечения устойчивости нанофлюида 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  $\alpha$  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/м<sup>2</sup>.

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.

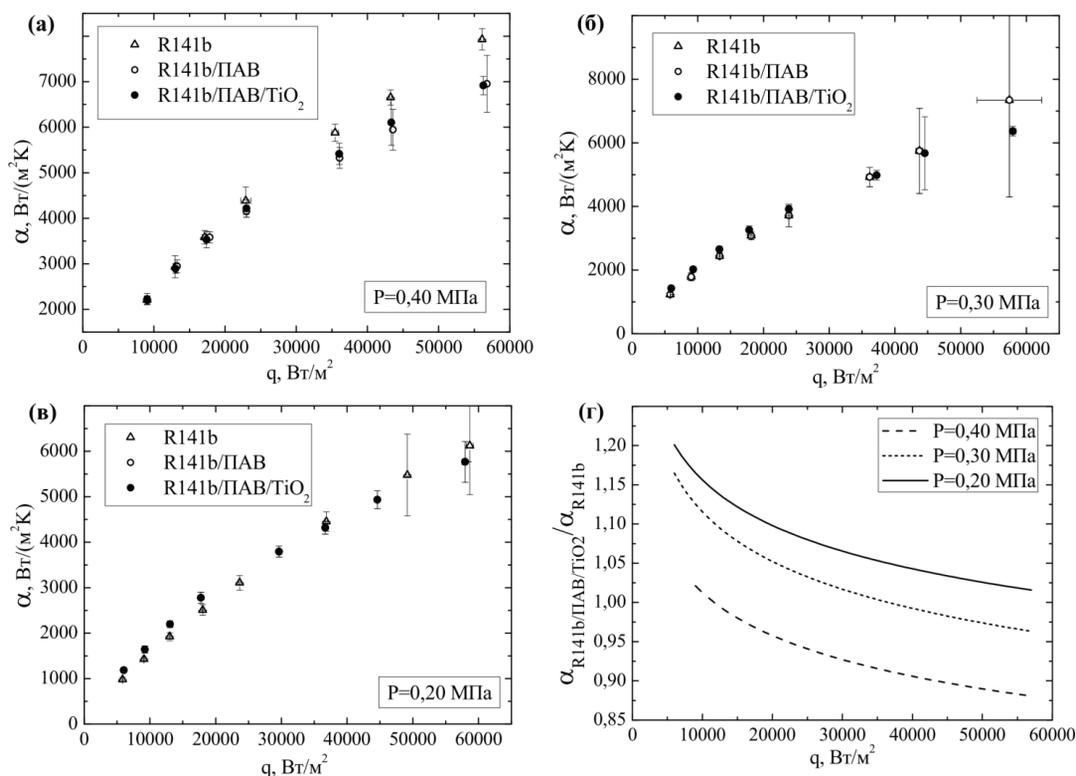


Рис. 1. Экспериментальные значения КТО при кипении в свободном объеме для R141b/ПАВ и R141b/ПАВ/TiO<sub>2</sub> в сравнении с чистым R141b: (а) 0,40-МПа, (б) 0,3-МПа, (в) 0,2-МПа, а так же отношение КТО для R141b/ПАВ/TiO<sub>2</sub> к КТО для R141b в зависимости от плотности теплового потока.

#### 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 TiO<sub>2</sub>-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 TiO<sub>2</sub>/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., Семенюк 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 межд. 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 TiO<sub>2</sub> nanoparticles additives in R141b on the nucleate pool boiling process**

**Khliyeva O.<sup>1</sup>, Gordeychuk T.<sup>1</sup>, Nikulin A.<sup>2</sup>, Lukianov N.<sup>1</sup>, Zhelezny V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, Odessa, Kanatnaya str., 112

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

The results of experimental study of effect of TiO<sub>2</sub> 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<sup>-2</sup> are pre-sented. Additives of TiO<sub>2</sub> 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 TiO<sub>2</sub>-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 TiO<sub>2</sub>/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