

УДК 532.11:532.612

## Экспериментальное исследование влияния фуллеренов $C_{60}$ на давления насыщенных паров и поверхностное натяжение растворов хладагента R600a с компрессорным маслом

С. А. Мороз, Н. Н. Лукьянов, В. П. Железный, Ю. В. Семенюк

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная 112, г. Одесса, 65039, Украина

*В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния примесей фуллеренов  $C_{60}$  на значения давления насыщенных паров и поверхностного натяжения растворов хладагента R600a/минеральное масло. Исследования проведены в интервале температур 283-353 К, при концентрациях масла в растворе 0,25; 0,5; 0,75 кг/кг и фуллеренов в масле  $2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг. Показано, что примеси фуллеренов в растворах хладагент/масло способствуют уменьшению поверхностного натяжения. Указанный эффект должен учитываться при оценке перспективности применения нанотехнологий в холодильном оборудовании.*

**Ключевые слова:** Эксперимент; Нанофлюиды; Растворы хладагент/масло/фуллерены  $C_{60}$ ; Давление насыщенных паров; Поверхностное натяжение

## Експериментальне дослідження впливу фуллеренів $C_{60}$ на тиск насичених парів і поверхневий натяг розчинів холодоагенту R600a з компресорним маслом

С. О. Мороз, Н. Н. Лук'янов, В. П. Железний, Ю. В. Семенюк

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна

*У статті наведено результати експериментального дослідження впливу домішок фуллеренів  $C_{60}$  на значення тиску насичених парів і поверхневого натягу розчинів холодоагенту R600a / мінеральне масло. Дослідження проведені в інтервалі температур 283-353 К, при концентраціях масла в розчині 0,25; 0,5; 0,75 кг/кг і фуллеренів в маслі  $2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг. Показано, що домішки фуллеренів в розчинах холодоагент / масло сприяють зменшенню поверхневого натягу. Зазначений ефект повинен враховуватися при оцінці перспективності застосування нанотехнологій в холодильному обладнанні.*

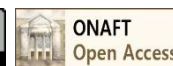
**Ключові слова:** Нанофлюїди; Розчини холодоагент/масло/фуллерени  $C_{60}$ ; Тиск насичених парів; Поверхневий натяг

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i2.597>

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### 1 Введение

В настоящее время включение наночастиц в состав рабочего тела компрессорной системы начинает рассматриваться как один из перспективных методов повышения показателей эффективности холодильной техники [1-4]. Наиболее часто наночастицы добавляют в компрессорные масла, которые в свою очередь являются необходимым компонентом реального рабочего тела (РРТ) в холодильном оборудовании [5]. Практическое применение наножидкостей в холодильной технике ориентировано на два перспективных направления: первое – повышение интенсивности теплопередачи

в аппаратах холодильного оборудования, второе – влияние примесей наночастиц в компрессорных маслах на показатели эффективности компрессорной системы. [4, 6] Кроме того, небольшие примеси наночастиц в теплоносителях позволяют изменять значение энергетических затрат при эксплуатации теплообменного оборудования [7].

Следует отметить, что в последние годы опубликовано много работ, посвященных изучению влияния наночастиц на теплопроводность, вязкость и теплоемкость различных базовых жидкостей [8]. Однако вопросы исследования влияния наночастиц на давление насыщенных паров и поверхностного натяжения базовых

вых жидкостей остаются недостаточно изученными. Вместе с тем, именно эти теплофизические свойства в значительной мере определяют интенсивность процессов кипения рабочего тела и значения параметров эффективности холодильного оборудования [9].

Исследование влияния наночастиц на давление насыщенных паров растворов HFC134a / минеральное масло изучалось в работе [10]. Исследования были проведены в интервале температур от 283 К до 823 К. В соответствии с данными, которые получены в этом исследовании, присутствие наночастиц в базовом растворе приводит к увеличению давления насыщенных паров в среднем до 7,61% (максимальный эффект составил 17,65%). К сожалению, в этой статье отсутствует детальная информация о методах подготовки образца нанофлюида к экспериментальным исследованиям и его устойчивости. Также отсутствуют данные о концентрации наночастиц и их размере.

Опубликованные данные о влиянии наночастиц на поверхностное натяжение остаются достаточно противоречивыми. Так, например, авторы в работе [11] пришли к заключению, что поверхностное натяжение наножидкостей вода /  $Al_2O_3$  уменьшается с увеличением объемной концентрации наночастиц и температуры. Авторы этой публикации также отмечают, что поверхностное натяжение нанофлюидов вода /  $Al_2O_3$  возрастает с увеличением размеров наночастиц. Аналогичные результаты были получены в работе [12] в которой авторы отмечают, что поверхностное натяжение нанофлюидов DIW (де-ионизированная вода) / наночастицы  $TiO_2$  проявляет тенденцию к снижению при более высоких концентрациях наночастиц. Напротив, исследования, проведенные в работе [13] показывают, что поверхностное натяжение нанофлюидов при низкой концентрации наночастиц  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и  $SiO_2$  возрастает.

Авторы в работе [14] пришли к заключению, что поверхностное натяжение нанофлюидов де-ионизированная вода / наночастицы ( $Al_2O_3$  и Al) линейно возрастает с увеличением как концентрации, так и размера наночастиц. Противоречивые результаты исследования влияния наночастиц  $Bi_2Te_3$  на поверхностное натяжение воды получены в работе [15]. Авторы указывают, что при небольших концентрациях наночастиц  $Bi_2Te_3$  поверхностное натяжение де-ионизированной воды уменьшилось. Однако, при увеличении концентрации наночастиц в жидкости поверхностное натяжение начинало возрастать.

Стоит обратить внимание, что в литературе практически нет информации о теплофизических свойствах растворов хладагент / масло / наночастицы. Исключением является недавно опубликованная авторами настоящей статьи работа [9]. В этой работе подробно исследуются вопросы влияния наночастиц  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  на вязкость, давление насыщенных паров, капиллярную постоянную и поверхностное натяжение растворов хладагента R600a в минеральном масле. Понятно, что такой ограниченный объем исходной информации недостаточен для формирования выводов о целесообразности применения нанохладагентов в холодильном оборудовании. Кроме того, остаются практически неизученными вопросы влияния наиболее перспективных для применения в рабочих телах пароконденсационных холодильных машин фуллеренов. Этот класс наноча-

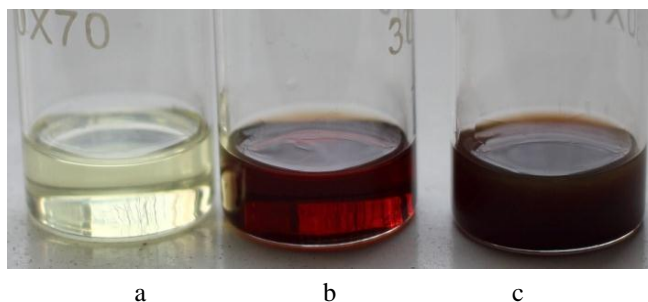
стиц обладает самыми необходимыми свойствами для повышения показателей энергетической эффективности компрессорных систем. Фуллерены образуют с маслами стабильные нанофлюиды [4], примеси фуллеренов будут способствовать уменьшению трения между подвижными деталями компрессора [7], технология получения фуллеренов хорошо разработана.

С учетом изложенного предметом настоящего исследования является изучение влияния фуллеренов  $C_{60}$  на поверхностное натяжение и давление насыщенных паров, растворов хладагента R600a в минеральном масле.

## 2 Экспериментальные исследования давления насыщенных паров и поверхностного натяжения растворов хладагент/минеральное масло/ фуллерены $C_{60}$

Компонентами объектов исследования являлись: хладагент R600a (изобутан), компрессорное минеральное масло ХФ16-12 (вязкость при 40°C 16 мм<sup>2</sup>/с) и фуллерены  $C_{60}$  (Sigma Aldrich) CAS№ 99685-96-8 с размером не более 0,7 нм.

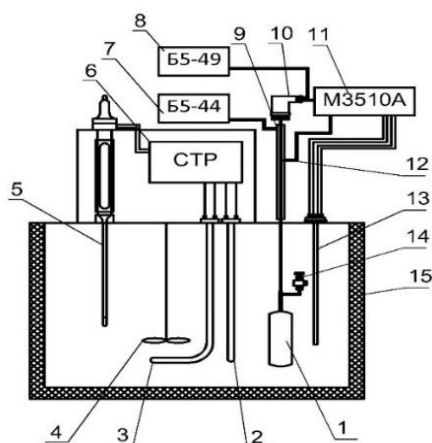
Исследования растворимости фуллеренов в маслах, а также устойчивости полученных образцов наномасла, заключались в изучении поглощения света молекулами фуллеренов в растворе. Значения коэффициентов поглощения света образцами приготовленных нанофлюидов сравнивались с данными полученными для чистого масла. Все исследования были проведены на спектрофотометре в плоскопараллельных оптических ячейках с длиной оптического пути 1,1 мм при нескольких значениях длин волн от 360 до 800 нм. Полученные результаты указывают на отличную стабильность образцов наномасла в течение двух месяцев. Фотографии образцов наномасла с содержанием фуллеренов 0,13 и 0,50 масс. % приведены на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Фотография образцов полученных минеральных наномасел:

a – минеральное компрессорное масло без фуллеренов; b – компрессорное масло с добавками фуллеренов  $C_{60}$  (0,13 масс.%); c – компрессорное масло с добавками фуллеренов  $C_{60}$  (0,50 масс. %)

Определение давления насыщенных паров растворов изобутан / масло / фуллерены (*nanoROS*) выполнено статическим методом. Схема экспериментальной установки для исследования давления насыщенных паров *ROS* и нанофлюидов на их основе представлена на рисунке 2.

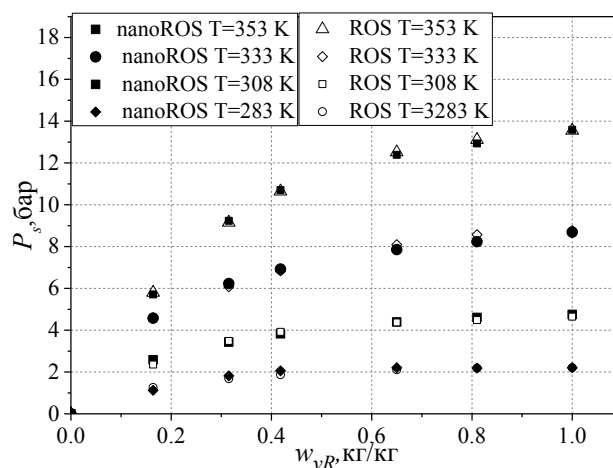


**Рисунок 2** – Схема экспериментальной установки для определения давления насыщенных паров: 1 – измерительная ячейка; 2 – фоновый нагреватель; 3 – разгонный нагреватель; 4 – мешалка; 5 – контактный термометр; 6 – система терморегулирования; 7 – источник постоянного питания Б5-44; 8 – источник питания Б5-49; 9 – нагреватель на балластном капилляре; 10 – преобразователь давления WKA S-10; 11 – мультиметр M3510A; 12 – термопара (DT838); 13 – платиновый термометр сопротивления TR10A; 14 – вентиль. 15 – термостат.

Измерительная ячейка расположена в термостате 15. Измерение температуры осуществлялось платиновым термометром сопротивления 13 (TR10A с погрешностью не выше  $\pm 0,05$  К). Термометр устанавливался вблизи средней части измерительной ячейки 1. Для измерения давления насыщенных паров ROS и nanoROS в верхней части балластного капилляра присоединён пьезоэлектрический преобразователь давления 10, который оснащён стабилизированным источником питания 8 и подключен к мультиметру 11. Контроль за температурой капилляра осуществлялся термопарой 12, соединённой с мультиметром 12. Термостат оснащён системой автоматического регулирования температуры 6. Колебания температуры в термостате не превышали 0,02 К.

Результаты исследования влияния фуллеренов C<sub>60</sub> на давление насыщенных паров ROS представлены на рисунке 3. Неопределенность в измерении давления

насыщенных паров ROS и nanoROS в зависимости от диапазона измеряемых давлений в проведенных исследованиях не превышала 0,03-0,11 бар.



**Рисунок 3** – Зависимость давления насыщенных паров раствора R600a/минеральное масло и R600a/ минеральное масло/C<sub>60</sub> ( $w_{nano} = 0,002$  кг/кг в масле) от концентрации хладагента в жидкой фазе –  $w_R$ .

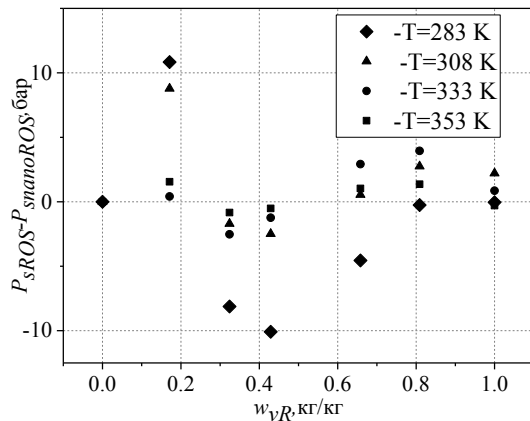
Полученные результаты (см. таблицу 1) позволяют прийти к заключению о том, что примеси фуллеренов C<sub>60</sub> не имеют однозначного влияния на давление насыщенных паров при отнесении экспериментальных данных к составу жидкой фазы растворов. Тем самым проведенный эксперимент подтверждает результаты противоречивых данных о влиянии наночастиц на давление насыщенных паров и поверхностное натяжение базовых жидкостей, которые были получены в работах [9, 16]. Этот результат нужно рассматривать как вполне закономерный при первичной обработке полученной экспериментальной информации. Однако проведенные ранее исследования показывают, что состав поверхностного слоя существенно отличается от состава раствора в жидкой фазе [9, 16]. Поэтому окончательный вывод о влиянии фуллеренов на поверхностное натяжение растворов хладагент / масло может быть сформулирован только при наличии информации о составе поверхностного слоя раствора. Эта задача будет решена авторами в последующих публикациях авторов.

**Таблица 1** – Экспериментальные значения давления насыщенных паров, капиллярной постоянной растворов R600a/ХФ16-12 и R600a/ХФ16-12/C<sub>60</sub>

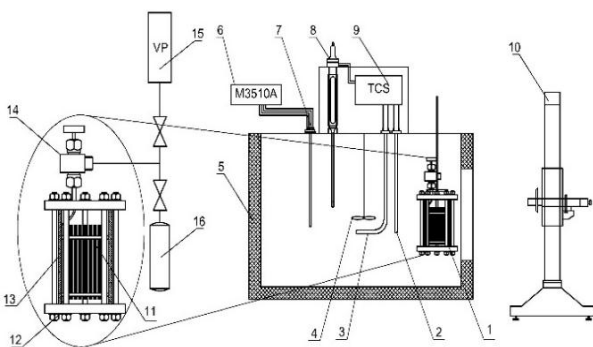
Давление насыщенных паров раствора R600a/ ХФ16-12			Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение раствора R600a/ ХФ16-12			
T, К	P, бар	$w_{vR}$ , кг/кг	T, К	$\alpha^2$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma$ , мН/м	$w_{vR}$ , кг/кг
354,61	12,51	0,65	282,8	4,32	13,23	0,73
333,84	8,09		293,05	4,14	12,52	0,66
308,91	4,39		303,15	4,00	11,99	0,58
282,9	2,1		286,45	4,44	15	0,51
353,33	9,15	0,418	293,14	4,42	14,75	0,46
333,62	6,84		304,04	4,38	14,59	0,38
308,73	3,82		283,06	5,5	21,05	0,22
345,3	10,45		293,5	5,58	21,44	0,18
353,55	9,15	0,319	302,33	5,66	21,90	0,13
333,49	6,07		285,48	7,22	25,06	0
308,34	3,42		293,49	7,17	24,64	0
283,18	1,67		303,02	7,08	24,05	0

Продолжение таблицы 1

Давление насыщенных паров раствора R600a/ XФ16-12 /C <sub>60</sub>			Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение раствора R600a/ XФ16-12 /C <sub>60</sub>				
T, К	P, бар	w <sub>VR</sub> , кг/кг	T, К	α <sup>2</sup> , мм <sup>2</sup>	σ, мН/м	w <sub>VR</sub> , кг/кг	w <sub>C60</sub> , кг/кг
353,61	12,86	0,78	283,53	4,21	12,95	0,74	0,5·10 <sup>-3</sup>
333,22	8,19		293,3	4,01	12,17	0,70	0,6·10 <sup>-3</sup>
308,10	4,47		303,26	3,9	11,72	0,66	0,7·10 <sup>-3</sup>
283,61	2,19		285,37	4,53	15,41	0,47	1,0·10 <sup>-3</sup>
353,2	11,81	0,54	293,23	4,56	15,56	0,42	1,2·10 <sup>-3</sup>
333,91	8,19		303,31	4,63	15,89	0,35	1,3·10 <sup>-3</sup>
308,30	4,23		284,86	5,11	18,94	0,28	1,4·10 <sup>-3</sup>
283,53	2,18		293,1	5,19	19,35	0,22	1,6·10 <sup>-3</sup>
353,48	7,29	0,22	303,73	5,26	19,79	0,13	1,7·10 <sup>-3</sup>
333,34	5,29		283,15	7,14	24,86	0	2·10 <sup>-3</sup>
308,25	2,9		293,22	7,06	24,3	0	2·10 <sup>-3</sup>
283,71	1,46		303,54	6,99	23,73	0	2·10 <sup>-3</sup>



**Рисунок 4** – Зависимость абсолютных отклонений  $P_{sROS} - P_{nanoROS}$  для растворов R600a/минеральное масло и R600a/минеральное масло/C<sub>60</sub> ( $w_{nano}=0,002$  кг/кг в масле) от концентрации хладагента в жидкой фазе –  $w_R$



**Рисунок 5** – Схема экспериментальной установки по исследованию поверхностного натяжения растворов R600a/минеральное масло и R600a/минеральное масло/C<sub>60</sub>: 1 – измерительная ячейка; 2 – фоновый нагреватель; 3 – регулирующий нагреватель; 4 – мешалка; 5 – термостат; 6 – мультиметр M3510a; 7 – платиновый термометр сопротивления; 8 – контактный термометр; 9 – система терморегулирования температуры; 10 – катетометр; 11 – капилляры; 12 – фланец; 13 – стеклянная

труба; 14 – вентиль; 15 – вакуумный насос; 16 – баллон с исследуемым веществом.

Исследование влияния фуллеренов C<sub>60</sub> на поверхностное натяжение б растворов хладагент / масло / фуллерены C<sub>60</sub> производилось дифференциальным методом капиллярного поднятия [17] Основным элементом измерительной ячейки 1 является каскада с семью капиллярами различного диаметра 11, которые установлены в стеклянной трубе 13. Уплотнение ячейки осуществляется фланцами 12. На верхнем фланце установлен вентиль 14, через который производилось вакуумирование и заправка ячейки исследуемым образцом.

Термостатирование измерительной ячейки осуществляется в жидкостном термостате, который имеет смотровые окна. Температура термостатирующей жидкости в термостате измерялась платиновым термометром сопротивления 7.

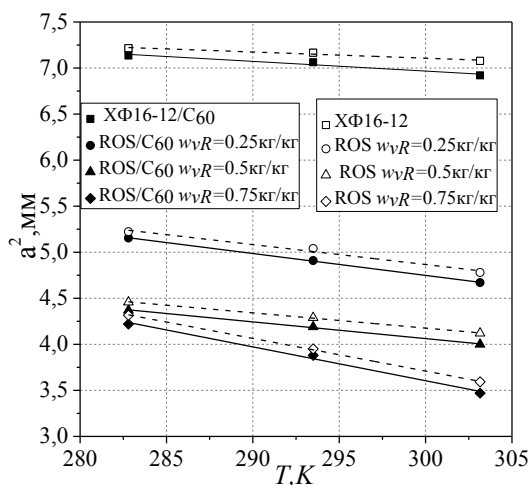
Для измерения уровней жидкой фазы образцов в капиллярах использовался катетометр 10. Термостат оснащен системой автоматического регулирования температуры 9.

Измерение капиллярной постоянной -  $a^2 ROS$  проведено при массовых долях хладагента в компрессорном масле 0,25; 0,5; 0,75 кг/кг. Исследование влияния фуллеренов C<sub>60</sub> на капиллярные постоянные растворов хладагент/масло производилось при концентрациях наночастиц в масле  $w_{nano}=0,002$  кг/кг, и массовых долях хладагента в ROS: 0,25; 0,5 и 0,75 кг/кг. Результаты исследования капиллярной постоянной ROS и nanoROS приведены на рисунке 6. Неопределенность в измерении капиллярной постоянной в проведенных исследованиях не превышала 0,025-0,041 мм.

Из информации, приведенной на рисунках 6 следует, что примеси фуллеренов C<sub>60</sub> в растворах хладагент/масло способствуют понижению капиллярной постоянной до 2%. Расчет поверхностного натяжения ROS и nanoROS производился по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot g \cdot a^2 \cdot (\rho' - \rho''), \quad (1)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотности жидкой фазы и паровой фазы, соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $a^2$  – капиллярная постоянная.



**Рисунок 6** – Температурная зависимость капиллярной постоянной растворов R600a/XФ16-12 и R600a/XФ16-12/C<sub>60</sub> ( $w_{nano}=0,002$  кг/кг в масле) на различных концентрациях хладагента в масле –  $w_{vR}$

Данные о плотности паров хладагента R600a были получены из базы данных [18] при определенных в эксперименте значениях температуры и давления ROS и nanoROS.

Проведенное исследование указывает на то, что примеси фуллеренов способствуют понижению поверхностного натяжения ROS (примерно до 3%).

#### 4 Выводы

Проведенные исследования показывают, что примеси фуллеренов C<sub>60</sub> в растворах R600a/масло способствуют понижению капиллярной постоянной. Влияние фуллеренов на давление насыщенных паров зависит как от состава растворов, так и температуры. Такое неоднозначное влияние примесей масла и фуллеренов на давление насыщенных паров растворов R600a/масло может быть объяснено отличием состава поверхностного слоя от состава жидкой фазы раствора [9, 16]. Результаты изучения влияния примесей масла и фуллеренов в хладагенте R600a на состав поверхностного слоя растворов R600a /масло будут представлены в дальнейших публикациях авторов.

#### Литература

1. **Godson, L.** Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview [Text] / L.Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises. // Renew. Sust. Energ. Rev. – 2010. – №14. – P. 629–641. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004
2. **Javadi, F.** Energetic, economic and environmental impacts of using nanorefrigerant in domestic refrigerators in Malaysia [Text] / F. Javadi, R. Saidur. // Energ. Convers. Manag.. – 2013. – №73. – P. 335–339. DOI: doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.013

3. **Bi, S.** Performance of a domestic refrigerator using TiO<sub>2</sub>-R600a nano-refrigerant as working fluid [Text] / S.Bi, K. Guo, Z. Liu, J. Wu. // Energ. Convers. Manage. – 2011. – Vol.52. – P. 733–737.
4. **Moroz, S.A.** The influence of the compressor oil viscosity and fullerenes C<sub>60</sub> additives in the oil on the energy efficiency of refrigeration compressor system [Text] / S.A. Moroz, O.Ya. Khlieva, N.N. Lukianov, V.P. Zhelezny // Vestnik of the International Academy of Refrigeration. – 2016. – Vol. 41. – P. 41-46. (in Russian). doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-41-46
5. **Zhelezny, V.P.** Influence of Compressor Oil Admixtures on Efficiency of a Compressor system /V.P. Zhelezny, S.V. Nichenko, Yu.V. Semenyuk, B.V. Kosoy, Ravi Kumar // Int. J. Refrig. – 2009.Vol. 32, Issue7. – P.1526-1535.
6. **Lukianov, N.N.** Influence of compressor oil and TiO<sub>2</sub> nanoparticle additives on the refrigerant flow boiling heat transfer coefficient inside horizontal tubes [Text]/ N.N. Lukianov, A.V. Melnyk, V.P.Zhelezny, O.Ya. Khliyeva, A.S. Moroz // Refrigeration technology and technology. – 2015. – Vol.51, Issue 5. – P.59-66. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004
7. **Meibo, X.** Application of fullerene C<sub>60</sub> nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors [Text] / X. Meibo, W. Ruixiang, Y. Jianlin. // Int. J. Refrigeration. – 2014. – Vol.40. – P. 398–403. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004
8. **Efstathios, E. Michaelides** Nanofluidics thermodynamic and transport properties [Text]/ Efstathios E. Michaelides //Springer, New York. – 2014. P. 335. DOI 10.1007/978-3-319-05621-0
9. **Zhelezny, V.P.**, A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R600a-mineral oil-TiO<sub>2</sub>. Thermophysical properties [Text]/ V.P. Zhelezny, N.N. Lukianov, O.Ya. Khliyeva, A.S. Nikulina, A.V. Melnyk// Int. J. Refrigeration. – 2017.-Vol.74.-P. 488–504 doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.11.008
10. **Rongji, X** Affection of nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> on the saturated pressure of mixture HFC134a/mineral oil [Text]/ X. Rongji, W. Ruixiang, C. Wei, Y. Gang, W. Yezheng // International Congress of Refrigeration. – 2007. – ICR07 – B1 – 1357 – P.1 – 4
11. **Zhu, B.** Thermophysical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids. in Materials Science Forum[Text] / B.J. Zhu. // Trans Tech Publ. – 2011. – Vol.688. – P.266-271.doi10.4028/www.scientific.net/MSF.688.266
12. **Radiom M.** Characterization of surface tension and contact angle of nanofluids. in Fourth International Conference on Experimental Mechanics [Text] / M. Radiom, C. Yang, W. Chan. // International Society for Optics and Photonics. – 2009. – Vol.7522.
13. **Kim S.** Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux [Text]/ S.J. Kim. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol.50. – P. 4105–4116. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002
14. **Tanvir, S.** Surface tension of Nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials / S. Tanvir, L. Qiao. // Nanoscale research letters. – 2012. – Vol.7, Issue 226. – P. 1–10. DOI: doi.org/10.1186/1556-276X-7-226
15. **Saeid, V.** The effect of nanoparticles on the liquid–gas surface tension of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nanofluids [Text]/V. Saeid, A. Purkayastha, A. Jain, G. Ramanath // Nanotechnology, –

2009. Vol. 20, Issue 18. – P. 1 – 5. DOI: 10.1088/0957-4484/20/18/185702

16. **Лозовский, Т. Л.** Поверхностное натяжение смесевых хладагентов и растворов хладагент/масло. Эксперимент методы прогнозирования. Часть 3: Поверхностное натяжение растворов хладагент/масло [Текст] / Т. Л. Лозовский, Ю. В. Семенюк, Д. А. Ивченко, Н.А. Приходченко, В.П. Железный // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 6 (122). – С. 38-46.

17. **Железный, В. П.** Температурная зависимость капиллярной постоянной и коэффициента поверхностно-

го натяжения неассоциированных жидкостей [Текст] / Железный, В.П. // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. «Физические константы и свойства веществ»). – 1991. № 31. С. 179-188.

18. **McLinden, M. O.** NIST Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerants mixtures database (REFPROP) Version 7.1 / M. O. McLinden, S. A. Klein, E. W. Lemmon, A. P. G. Peskin // – Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology. – 2003.

Отримана в редакції 20.01.2017, прийнята до друку 25.04.2017

## Experimental Research of C<sub>60</sub> Fullerene Influence on Saturated Vapors Pressures and Surface Tension of R600a Refrigerant and Compressor Oil Solutions

S. A. Moroz, N. N. Lukianov, V. P. Zhelezny, Yu. V. Semenyuk

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odessa, 65039, Ukraine

*The results of an experimental study of the effect of C<sub>60</sub> fullerene impurities on the saturated vapor pressure and surface tension of R600a / mineral oil solutions are presented. Studies were carried out in the temperatures range 283-353 K, at oil concentrations in the solution of 0.25; 0.5; 0.75 kg / kg and fullerenes in oil 2·10<sup>-3</sup> kg / kg. It is shown that the impurities of fullerenes in refrigerant / oil solutions contribute to the reduction of surface tension. This effect should be taken into account in assessing the prospects for the use of nanotechnology in refrigeration equipment.*

**Keywords:** Nanofluids; Refrigerant / oil solutions; Saturated vapor pressure; Surface tension.

### References

1. **Godson, L., Raja B., Mohan Lal, D., Wongwises, S.** (2010) Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 14(2), 629–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004>
2. **Javadi, F., Saidur, R.** (2013) Energetic, economic and environmental impacts of using nanorefrigerant in domestic refrigerators in Malaysia. *Energ. Convers. Manag.*, Vol. 73, 335–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.013>
3. **Bi, S., Guo, K., Liu, Z., Wu, J.** (2011) Performance of a domestic refrigerator using TiO<sub>2</sub>-R600a nano-refrigerant as working fluid. *Energ. Convers. Manage.*, 52(1), 733–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.052>
4. **Moroz, S.A., Khlieva, O.Ya., Lukianov, N.N., Zhelezny, V.P.** (2016) The influence of the compressor oil viscosity and fullerenes C<sub>60</sub> additives in the oil on the energy efficiency of refrigeration compressor system. *Vestnik of the International Academy of Refrigeration*, 41, 41–46. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-16-1-41-46>
5. **Zhelezny, V.P., Nichenko, S.V., Semenyuk, Yu.V., Kosoy, B.V., Ravi Kumar** (2009) Influence of Compressor Oil Admixtures on Efficiency of a Compressor system. *Int. J. Refrig.* 32(7), 1526-1535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.03.001>
6. **Lukianov, N.N., Melnyk, A.V., Zhelezny, V.P., Khliyeva, O.Ya., Moroz, A.S.** (2015) Influence of compressor oil and TiO<sub>2</sub> nanoparticle additives on the refrigerant flow boiling heat transfer coefficient inside horizontal tubes.

*Refrigeration Engineering and Technology*, 51 (5), 59-66. (in Russian) DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.5/2015.44790>

7. **Meibo, X., Ruixiang, W., Jianlin, Y.** (2014) Application of fullerene C<sub>60</sub> nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors. *Int. J. Refrigeration*, 40, 398–403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004>

8. **Efstathios E. Michaelides** (2014) *Nanofluidics thermodynamic and transport properties*. Springer, New York, 335 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05621-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05621-0_3)

9. **Zhelezny, V.P., Lukianov, N.N., Khliyeva, O.Ya., Nikulina, A.S., Melnyk, A.V.** (2017) A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R600a-mineral oil-TiO<sub>2</sub>. Thermophysical properties. *Int. J. Refrigeration*. 74, 488–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.11.008>

10. **Rongji, X., Ruixiang, W., Wei, C., Gang, Y., Yezheng, W.** (2007) Affection of nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> on the saturated pressure of mixture HFC134a/mineral oil. *International Congress of Refrigeration ICR07*, B1, 1357, p. 1–4.

11. **Zhu, B.** (2011) Thermophysical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids. *Trans Tech Publ*, 688, 266–271 DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.688.266>

12. **Radiom, M., Yang, C., Chan, W.** (2009) Characterization of surface tension and contact angle of nanofluids. In Fourth International Conference on Experimental Mechanics. International Society for Optics and Photonics. Proceedings Vol. 7522. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.851278>

13. **Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J., Hu, L.W.** (2007) Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19-20), 4105–4116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002>
14. **Tanvir, S., Qiao, L.** (2012) Surface tension of Nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials. *Nanoscale research letters*, 7(226), 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-226>
15. **Saeid, V., Purkayastha, A., Jain, A., Ramanath, G.** (2009) The effect of nanoparticles on the liquid–gas surface tension of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nanofluids. *Nanotechnology*, 20(18), 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/18/185702>
16. **Lozovsky, T.L., Semenyuk, Yu.V., Ivchenko, D.A., Prihodchenko, N.A., Zhelezny, V.P.** (2009) Surface tension of mixed refrigerants and refrigerant / oil solutions. Experiment methods of forecasting. Part 3: Surface tension of refrigerant / oil solutions. *Refrigeration Engineering and Technology*, No.6 (122), 38–46.
17. **Zhelezny, V.P.** (1991) Temperature dependence of the capillary constant and the coefficient of surface tension of nonassociated liquids. *Thermophysical properties of substances and materials*, Vol. 31, 179–188.
18. **McLinden, M. O., Klein S. A., Lemmon E. W., Peskin A. P. G.** (2003) NIST Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerants mixtures database (REFPROP) Version 7.1 Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology.
- 

Received 20 January 2017  
Approved 25 April 2017  
Available in Internet 29 May 2017