УДК 536.632

Плотность и вязкость растворов хладагент R600a / минеральное масло / фуллерены C_{60}

С. А. Мороз, Н. Н. Лукьянов, В. П. Железный
Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная 112, г. Одесса, 65039, Украина

В статье представлены результаты экспериментального исследования температурной и концентрационной зависимостей плотности и вязкости, растворов хладагент R600a/минеральное масло ХФ16-12/ фуллерены C_{60}. Измерения плотности выполнены пикнометрическим методом в диапазоне температур 258-353 К. Вязкость измерена методом катящегося шарика в интервале температур 253-283 К. На основании полученных экспериментальных данных выполнен анализ влияния примесей компрессорного масла и фуллеренов C_{60} на плотность и вязкость хладагента R600a. Показано, что примеси фуллеренов способствуют понижению вязкости рабочего тела (хладагент R600a/минеральное масло ХФ16-12) во всем интервале параметров исследования. Рабочее тело - R600a/минеральное масло ХФ16-12/ фуллерены C_{60} рекомендуется для использования в бытовой холодильной технике.

Ключевые слова: Растворы; Хладагент; Фуллерены; Эксперимент; Плотность; Вязкость; Концентрация

Густина і в'язкість розчинів холодоагент R600a / мінеральне масло / фулерени C_{60}

С. О. Мороз, М. М. Лук'янов, В. П. Желєзний
Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна

У статті представлені результати експериментального дослідження температурної і концентраційної залежності густини і в'язкості, розчинів холодоагент R600a / мінеральне масло ХФ16-12 / фулерени C_{60}. Вимірювання густини виконані пікнометричним методом в діапазоні температур 258-353 К. В'язкість виміряна методом кульки, що котиться в інтервалі температур 253-283 К. Робоче тіло – R600a / мінеральне масло ХФ16-12 / фулерени C_{60} рекомендується для використання в побутовій холодильній техніці. На підставі отриманих експериментальних даних виконано аналіз впливу домішок компресорного масла і фулеренів C_{60} на густину і в'язкість холодоагенту R600a. Показано, що домішки фулеренів сприяють зниженню в'язкості робочого тіла холодоагент R600a / мінеральне масло ХФ16-12 у всьому інтервалі параметрів дослідження.

Ключові слова: Розчини; Холодоагент; Фулерени; Експеримент; Густина; В'язкість; Концентрація

DOI: http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.544
This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
© The Author(s) 2017.

1 Введение

В настоящее время включение наночастиц в состав рабочего тела компрессионной холодильной системы рассматривается как один из перспективных методов повышения показателей эффективности холодильной техники [1]. Наиболее часто наночастицы добавляют в компрессорные масла, которые в свою очередь являются необходимым компонентом реального рабочего тела (РРТ) в парокомпрессионном холодильном оборудовании [1-3]. Ряд авторов [1-4] отмечают, что повышение показателей энергетической эффективности холодильного оборудования достигается как за счет изменения теплофизических свойств реального рабочего тела (раствора хладагент/масло (РХМ), так и уменьшения трения в сопрягаемых деталях компрессорной системы и интенсификации процессов теплообмена в аппаратах холодильного оборудования.

Проблема учета влияния наночастиц на вязкость технических жидкостей рассматривалась во многих работах. Так авторы статьи [5] привели результаты исследования вязкости TiO_2/этиленгликоль, при концентрациях 0,5-8,0 масс. % и температуре 20-60°С. Приведенные данные показывают, что вязкость раствора увеличилась с увеличением концентрации наночастиц. Вязкость изученных растворов сильно зависела от температуры и концентрации наночастиц.

В работе [6] авторы представили результаты исследования влияния сурфактантов SDBS на вязкость растворов Al_2O_3/вода при концентрациях Al_2O_3 0,04-0,16 масс. % и температурах 30-70°С. Результаты этих исследований показывают, что основной эффект на вязкость оказывают сурфактанты и температура. Напротив, влияние наночастиц на вязкость изученных растворов было незначительным.

Авторы работы [7] представили данные о вязкости нанофлюидов SiO_2/вода и Al_2O_3/вода. Результаты этого исследования показывают, что вязкость изученных растворов увеличилась с возрастанием концентрации наночастиц.

Рудяк В.Я. в работе [8] приводит результаты исследования вязкости на основе дистиллированной воды с частицами оксида меди. Приведенные данные показывают, с уменьшением размера наночастиц вязкость нанофлюидов увеличивается. Причем, при объемной концентрации наночастиц оксида меди 0,25%, жидкость становиться неньютоновской.

Ряд исследователей отмечает, что выбор базовой жидкости не имеет существенного влияния на относительное изменение вязкости нанофлюидов. Например, нанофлюиды Al_2O_3/этиленгликоль и Al_2O_3/вода имеют аналогичный прирост вязкости базовых жидкостей [9].

Этот вывод не является бесспорным. Например, авторы работы [10] обнаружили различный прирост вязкости для двух вышеуказанных наножидкостей.

Данные о влиянии наночастиц на вязкость базовых жидкостей носят очень противоречивый характер. Так, например, в статьях [9] и [11] авторы обнаружили близкие значения увеличения вязкости для водных растворов, содержащих 5 об. % Al_2O_3. Напротив, в работе [12, 13] авторы обнаружили различный прирост вязкости для одного и того же типа наножидкостей. В работе [14] авторы отмечают, что вязкость наножидкостей сильно зависит от свойств базовой жидкости, но слабо зависит от материала наночастиц.

Некоторые авторы в своих работах [15-17] показывают, что относительная вязкость не зависит от температуры. Ряд авторов, например, [18-20] отмечают, что вязкость наножидкостей уменьшается нелинейно или экспоненциально с увеличением температуры.

С последним выводом не согласны некоторые авторы. Например, ряд исследователей [15, 21] указывают на линейное увеличение вязкости с увеличением объемных концентраций наночастиц. Напротив, другие авторы [16, 22, 23] отмечают нелинейный характер изменения вязкости от концентрации наночастиц. Причем, для одних тех же наножидкостей с одинаковой концентрацией наночастиц иногда проявляется разное увеличение вязкости.

Среди авторов, которые изучают вязкость нанофлюидов, отсутствует общее мнение о влиянии размера частиц на вязкость наножидкостей. Некоторые исследователи сообщают, что размер частиц не оказывает существенного влияния на вязкость [15]. Однако большая часть исследователей отмечают, что размер наночастиц и их форма оказывают заметное влияние на вязкость базовых жидкостей. Например, авторы работ [19, 24-26] утверждают, что вязкость нанофлюидов увеличивается с уменьшением размера наночастиц. Напротив, другие авторы [22, 23, 27] считают, что имеется обратная тенденция изменения вязкости за счет увеличения размера частиц.

Следует заметить, что в литературе практически отсутствует информация о влиянии наночастиц на плотность и вязкость реальных рабочих тел для компрессионных холодильных машин [28]. Вместе с тем теплофизические свойства нанофлюидов, которые получены на основе растворов хладагент/масло, необходимы для изучения процессов теплообмена при конденсации и кипении рабочего тела в испарителе холодильной машины.

В ряде публикаций, например [29], авторы отмечают, что процессы теплообмена зависят от присутствия наночастиц в рабочем теле, которые влияют на теплофизические свойства базовых жидкостей, в том числе и на вязкость [29, 30]. Причем увеличение коэффициента теплоотдачи в испарителе обусловлено не только изменениями теплофизических свойств кипящего нанохладагента, но и за счет образования дополнительных центров парообразования [31].

В литературе уже представлено несколько обзоров [30, 32, 33], в которых изучается влияние наночастиц на вязкость базовых жидкостей. Большинство авторов отмечают, что примеси наночастиц способствуют повышению вязкости базовых жидкостей. Причем вязкость нанофлюидов зависит как от температуры и объемной концентрации, так и размеров и формы наночастиц

Однако в литературе до сих пор отсутствуют публикации, посвященные изучению влияния фуллеренов на вязкость рабочих тел. Очевидно, что без достоверных данных по вязкости рабочих тел с примесями наночастиц достаточно сложно интерпретировать экспериментальные данные как по теплообмену в испарителе, так и по затратам энергии на работу компрессора холодильной машины [1].

Кроме того, исследования вязкости растворов хладагент/масло/наночастицы должны способствовать формированию базы справочных данных о теплофизических свойствах технически важных нанофлюидов. В настоящее время в литературе отсутствуют надежные модели для прогнозирования вязкости нанофлюидов [32]. Поэтому формирование базы справочных данных о теплофизических свойствах нанофлюидов будет способствовать разработке научно обоснованных представлений о взаимодействии наночастиц с молекулами базовой жидкости, которые лягут в основу новых моделей прогнозирования свойств нанофлюидов.

Изучение теплофизических свойств нанофлюидов на основе рабочих тел парокомпрессионных холодильных машин является актуальной проблемой, которая требует своего решения. Именно термодинамические и транспортные свойства рабочих тел определяют, как величину показателей эффективности холодильной компрессорной системы, так и интенсивность процессов теплообмена в аппаратах холодильных установок.

2 Подготовка образцов

Анализ опубликованных работ, посвященных изучению вязкости нанофлюидов [32, 33], показывает, что подготовка образцов является, ключевым фактором для получения стабильных образцов для проведения исследований.

В настоящей работе компонентами объектов исследования являлись: хладагент R600a (изобутан), компрессорное минеральное масло ХФ16-12 (вязкость при 40^0С 16 мм^2/с) и фуллерены C_{60}(Sigma Aldrihc) с размером не более 0,7 нм.

Исследование вязкости раствора изобутана R600a, минерального масла ХФ 16-12 с примесями фуллеренов C_{60} (w_{nano}=0,2 масс. % в масле) проводились при трех концентрациях масла в ROS: 0,25, 0,5 и 0,75 масс.%. Технология приготовления наномасла заключалась в диспергировании наночастиц C_{60} в компрессорном масле в ультразвуковой ванне Codison CD 4800 с частотой 42 кГц в течение 30 минут. Длительное (в течении 1 месяца) наблюдение за компрессорным маслом с добавками наночастиц (наномаслом) показало хорошую агрегативную устойчивость фуллеренов (без выпадения осадка и помутнения). Для приготовления рабочего тела R600a/ХФ16-12/C_{60} определенное количество наномасла смешивалось с необходимым количеством хладагента без дополнительного ультразвукового диспергирования.

3 Определение плотности растворов хладагент R600a / минеральное компрессорное масло / фуллерены C_{60}

Исследование плотности РХМ производилось пикнометрическим методом. Схема экспериментальной установки по исследованию плотности объектов исследования приведена на рисунке 1. Стеклянная ампула с исследуемым веществом 3 (пикнометр) помещена в термостат 4, оснащенный теплообменником 2, по которому прокачивается термостатирующая жидкость из термостата 8. При измерении плотности при температурах ниже окружающей среды термостат 8 подключался к холодильной машине (на рисунке 1 не показано). Проведенные исследования показывают, что колебания температуры в термостате 4 не превышали 0,02 К. Измерение сопротивления термометра осуществлялось по компенсационной схеме с использованием мультиметра 7. Температура в проведенных экспериментах измерялась платиновым термометром сопротивления 6 (Wika TR10A) с расширенной неопределенностью не более ±0,05 К). Расширенная неопределённость измерения концентрации примесей масла в РХМ не превышала 0,04% и концентрации фуллеренов в масле не более 1,47%.

Для измерения уровня жидкой фазы образца РХМ в измерительной ячейке (пикнометре) использовался катетометр 5.

Эксперимент проводился в интервале температур от 258 до 353 К и массовых долях хладагента в масле: 0,25; 0,5 и 0,75 кг/кг. Расширенная неопределенность измерения плотности РХМ не превышала 6 кг/м^3. Влияние наночастиц на плотность РХМ рассчитывалось по методике, приведенной в работе [33].

$$\rho_{nanoROS} = \varphi_{nano} \cdot \rho_{nano} + (1-\varphi_{nano}) \cdot \rho_{ROS}, \qquad (1)$$

где φ_{nano} – объемная доля фуллеренов в растворе, м^3/м^3; ρ_{nano} – плотность фуллеренов, кг/м^3; ρ_{ROS} – плотность ROS, кг/м^3.

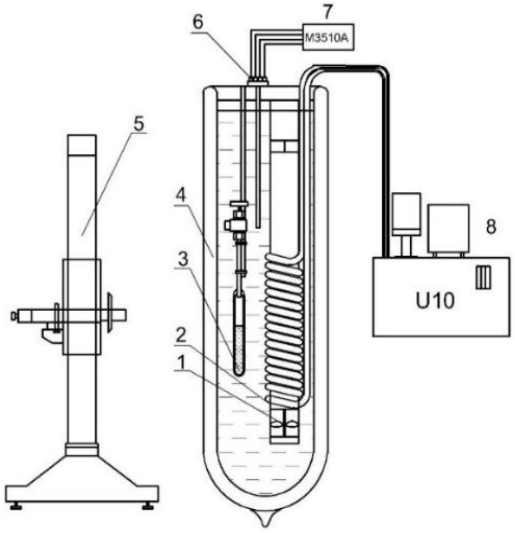

Рисунок 1 *– Экспериментальная установка по исследованию плотности РХМ: 1 – мешалка; 2 – теплообменник; 3 – ячейка с исследуемым веществом; 4 – термостат; 5 – катетометр; 6 – платиновый термометр сопротивления TR10A; 7 – мультиметр M3510A; 8 – термостат U10*

Результаты проведенного исследования приведены в таблице 1. Концентрационную зависимость плотности растворов R600a/минеральное масло при различных температурах демонстрирует рисунок 2.

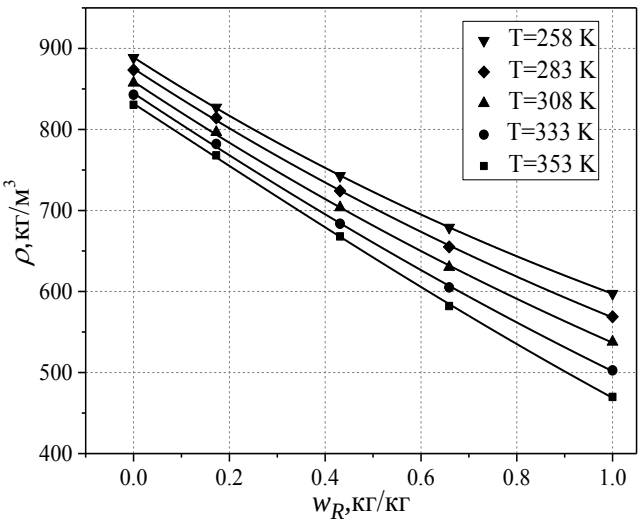

Рисунок 2 *– Концентрационная зависимость плотности растворов R600a/минеральное масло при различных температурах*

Таблица 1 – Экспериментальные данные плотности и вязкости растворов R600a/ХФ16-12 и R600a/ХФ16-12/C_{60}

Плотность раствора R600a/масло			Динамическая вязкость раствора R600a/масло			Динамическая вязкость раствора РХМ/C_{60}			
T, К	ρ, кг/м^3	w_R, масс.%	T, К	η, мПа·с	w_R, масс.%	T, К	η, мПа·с	w_R, масс.%	w_{C60}, масс.%
258,32	679,4	65,8	255,18	1,99	74,9	255,18	1,95	74,3	0,05
283,21	655,3		265,15	1,82		265,15	1,79		
308,12	630,5		275,10	1,69		275,11	1,66		
333,24	605,1		285,20	1,55		285,28	1,53		
353,22	582,2								
258,15	742,6	43,1	255,18	3,01	47,9	255,18	2,93	47,9	0,1
283,12	724,2		265,15	2,76		265,15	2,70		
308,13	703,4		275,10	2,54		275,12	2,49		
333,32	683,3		285,20	2,37		285,23	2,34		
353,23	668,2								
258,22	827,5	17,2	255,18	5,03	24,9	255,18	4,85	24,9	0,15
283,11	814,3		265,15	4,49		265,15	4,36		
308,33	796,1		275,10	4,00		275,15	3,89		
333,14	782,2		282,50	3,75		285,24	3,63		
353,21	768,2								

4 Измерение вязкости растворов хладагент R600a / минеральное компрессорное масло / фуллерены C_{60}

Экспериментальное исследование динамической вязкости – η растворов хладагент/масло и хладагент/масло/фуллерены C_{60} выполнено методом катящегося шарика на вискозиметре Гепплера. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

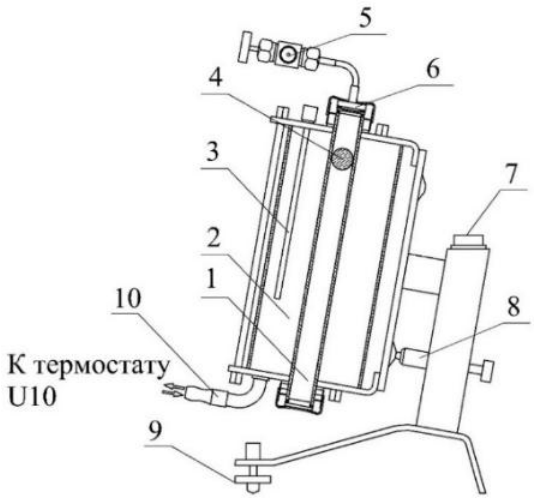

Рисунок 3 *- Экспериментальная установка для исследования динамической вязкости РХМ и наноРХМ методом катящегося шарика*:

1 – трубка с исследуемым веществом; 2 – термостат; 3 – платиновый термометр сопротивления TEPA 500 Pt; 4 – шарик; 5 – заправочный вентиль; 6 – крышка; 7 – уровень; 8 – фиксирующий шток; 9 – винт для установки уровня; 10 – патрубок для соединения с термостатом.

Измерения вязкости выполнены в диапазоне температур от 253 до 293 К и массовых долях хладагента в масле: для ROS 0,25, 0,5 и 0,75 кг/кг, для ROS/C_{60} 0,25, 0,5 и 0,75. Концентрация фуллеренов C_{60} в масле составляла 0,2 масс.%. Расширенная неопределенность измерения температуры в проведённых исследованиях не превышала 0,2 К, концентрации примесей масла в ROS 0,04 % и примесей фуллеренов в масле ± 1.47 %. Результаты экспериментальных данных приведены в таблице 1. Зависимость динамической вязкости растворов R600a/ХФ16-12 и R600a/ХФ16-12/C_{60} (w_{nano}=0,2 масс. % в масле) от концентрации хладагента в жидкой фазе – w_R. представлена рисунке 4.

Расчет динамической вязкости РХМ и наноРХМ производился по следующей формуле

$$\eta = K \cdot (\rho_b - \rho') \cdot \tau \,, \qquad (2)$$

где K – постоянная прибора, м^2/с^2; ρ_b – плотность шарика, кг/м^3; ρ' – плотность жидкой фазы объекта исследования, кг/м^3; τ – время перемещения шарика на заданном участке, с.

Выполненный анализ показывает, что расширенная неопределенность измерения вязкости РХМ и наноРХМ в проведенных исследованиях в зависимости от диапазона находится при температуре 253 К равна 0.02 мПа·с и при температуре 283К-0.88 мПа·с.

5 Заключение

Проведенное исследования плотности и вязкости растворов R600a ХФ16-12 и R600a/ХФ16-12/C_{60} показывает, что примеси компрессорного масла в хладагенте R600a приводят к значительному увеличению плотности и вязкости. Поскольку концентрация фуллеренов очень незначительна (см. таблицу) их влияние на плотность практически отсутствует. Напротив, влияние фуллеренов на вязкость РХМ представляет значительный интерес.

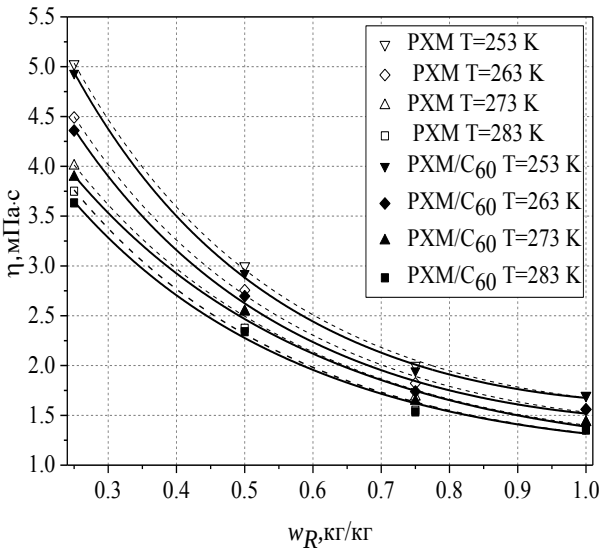

Рисунок 4 *– Зависимость динамической вязкости раствора R600a ХФ16-12 и R600a/ХФ16-12/C_{60} (w_{nano} = 0,2 масс. % в масле) от концентрации хладагента в жидкой фазе – w_R*

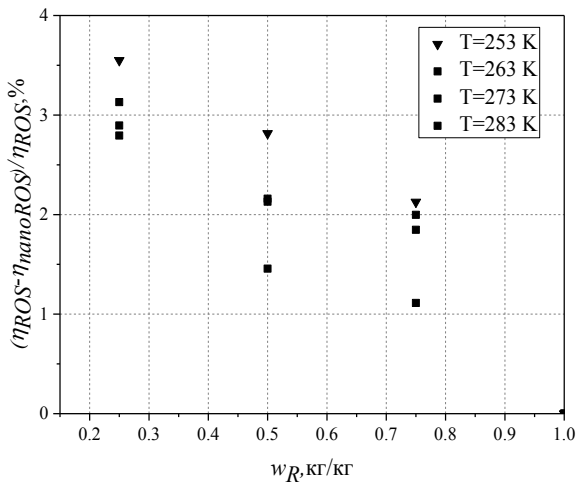

Рисунок 5 – Зависимость относительных отклонений (η_{ROS}-$\eta_{nanoROS}$)/ η_{PXM}, для растворов R600a/минеральное масло и R600a / минеральное масло / C_{60} (w_{nano}=0,2 масс % в масле) от концентрации хладагента в жидкой фазе – w_R

Проведенные исследования показывают, что даже небольшие примеси наночастиц в рабочем теле парокомпрессионной холодильной машины приводят к значительному уменьшению вязкости РХМ – от 1% до 3,5%. Этот эффект влияния фуллеренов несомненно имеет позитивное значение. Из полученных экспериментальных данных следует, что уменьшение затрат электроэнергии потребляемой компрессорной системой [1, 34] определяются как уменьшением трения в сопрягаемых деталях компрессора, так и уменьшением вязкости РХМ. Уменьшение вязкости растворов хладагент/масло будет также способствовать лучшему уносу примесей масла их испарителя холодильной машины. С учетом высокой стабильности нанофлюидов, можно констатировать, что применение примесей фуллеренов в рабочем теле имеет высокую перспективу внедрения в парокомпрессионной бытовой холодильной технике.

Литература

1. **Мороз, С.А.** Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C_{60} в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы [Текст] / С.А.Мороз, О.Я. Хлиева, Н.Н. Лукьянов, В.П. Железный // Вестник Международной академии холода. – 2016. – №41. – С. 41–46.
2. **Kedzierski, M.A.** Effect of CuO Nanoparticle Concentration on R134a-Lubricant Pool Boiling Heat Transfer [Text] / M.A. Kedzierski // Micro-Nanoscale Heat Transfer International Conference, 2008: Proceedings Taiwan – N. Y. – P. 1–8.
3. **Azmi, M. Z.** Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system [Text] / W. H. Azmi, M. Z. Sharif, T. M. Yusof // Renew. Sust. Energ. Rev. – 2017. –Vol. Issue 69. – P. 415–428.
4. **Wang, R.** Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants [Text] / R. Wang, Q. Wu, Y. Wu // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42, Issue 11. – P. 2111–2117.
5. **Chen, H.** Rheological behavior of nanofluids [Text] / H. Chen, Y. Ding, C. Tan. // New Journal of Physics. – 2007. – Vol. 9, Issue 367.P. –24.
6. **Zhu, D.S.** Influence of SDBS on viscosity for aluminium nano-suspensions [Text] / D.S. Zhu, X.F. Li, J.W. Gao, X.J. Wang, H. Li, Z.J. Wu // International Congress of Refrigeration. – 2007. –P.1– 7.
7. **Tavman, I.** Experimental investigation of viscosity and thermal conductivity of suspensions containing nanosized ceramic particles [Text] / I. Tavman, A. Turgut, M. Chirtoc, H.P. Schuchmann, S. Tavman // International Scientific Journal. – 2008. – Vol.34, Issue 2. – P. 99–104.
8. **Гузей, Д. В.** Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе оксида меди в цилиндрическом канале [Текст] / Д. В. Гузей, А. В. Минаков, В. Я. Рудяк, А. А. Дектерев // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т.40, №5. – С. 34–42.
9. **Wang X.** Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture [Text] / X. Wang, X. Xu, S. Choi // J. Thermophys. Heat Transfer. – 1999. – Vol.13, Issue 4. – P. 474–480.
10. **Anoop, K.B.** Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration [Text] / K.B. Anoop, S. Kabelac, T. Sundararajan, S.K. Das. // J. Appl. Phys. – 2009. Vol.106, Issue 3. – P. 0.34909.
11. **Murshed, S.M.S.** Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids [Text] / S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang. // Int. J. Therm. Sci.– 2008. – Vol.47, Iss. 5. – P. 560–568.
12. **Murshed, S.M.S.** Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics [Text] / S.M.S. Murshed, S. Tan, N. Nguyen // Journal of Physics. – 2008. – Vol.41, Issue 8. – P. 1–5.

13. **Chandrasekar M.** Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/ water nanofluid [Text]/ M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol.34, Issue 2. – P. 210–216.

14. **Timofeeva, E.V.** Nanofluids for heat transfer: an engineering approach [Text] / E.V. Timofeeva, W. Yu, D.M. France, D. Singh, J.L. Routbort // Nanoscale Res. Lett. – 2011. – Vol. 6, Issue 182. – P. 1–7.

15. **Prasher, R.** Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications [Text] / R. Prasher, D. Song, J. Wang, P. Phelan. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89, Issue 13. – P. 133108.

16. **Chen, H.** Rheological behavior of ethylene glycol based titania nanofluids [Text] / H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan. // Chem. Phys. Lett. – 2007. – Vol.444. – P. 333–337.

17. **Chen, H.** Rheological behaviour of nanofluids [Text] / H. Chen, Y. Ding, C. Tan. // New J. Phys. – 2007. – Vol. 9, Issue 367 – P. 1-24.

18. **Kole, M.** Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant [Text] / M. Kole, T. Dey. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol.43, Issue 31 – P. 677–683.

19. **Namburu, P.** Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids [Text] / P. Namburu, D. Kulkarni, A. Dandekar, D. Das. // Micro Nano Lett. – 2007. – Vol.2, Issue 3. – P. 67–71.

20. **Namburu, P.** Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture [Text] / P. Namburu, D. Kulkarni, D. Misra, D. Das. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2007. – Vol. 32. – P. 397–402.

21. **Garg, J.** Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid [Text] / J. Garg, B. Poudel, M. Chiesa. // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol.103, Issue 7. – P. 1–6.

22. **Nguyen, C.** Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – hysteresis phenomenon [Text] / C. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy. // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, Issue 6. – P. 1492–1506.

23. **He, Y.** Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe [Text] / Y. He, Y. Jin, H. Chen // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 2272–2281.

24. **Chevalier, J.** Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels [Text] / J. Chevalier, O. Tillement, F. Ayela. // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 91.

25. **Pastoriza-Gallego, M.** CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behavior and viscosity [Text] / M.Pastoriza-Gallego, C. Casanova, J. Legido, M. Piñeiro. // Fluid Phase Equilib. – 2011. – Vol. 300. – P. 188–196.

26. **Lu, W.** Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method [Text] / W. Lu, Q. Fan. // Eng. Anal. Boundary Elem. – 2008. – Vol. 32. – C. 282-289.

27. **Nguyen, C.** Viscosity data for Al_2O_3–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable [Text] / C. Nguyen, F. Desgranges, N. Galanis // Int J. Therm. Sci. – 2008. – Vol. 47, Issue 2. – C. 103–111.

28. **Zhelezny, V.P.** A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oilAl_2O_3 and R600a-mineral oil-TiO_2. Thermophysical properties. [Text] / V.P. Zhelezny, N.N. Lukianov, O.Ya. Khliyeva, A. S. Nikulina, A.V. Melnyk // Int. J. Refrigeration. – 2008. – Vol. 74. – P. 486-502.

29. **Никулин, А. Г.** Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме [Text] / А. Г. Никулин, Ю. В. Семенюк, Н. Н. Лукьянов. // Холодильна техніка і технологія. – 2013. – № 4(144). – С. 12–18.

30. **Железный, В. П.** Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанофлюидов в свободном объеме [Text] / В. П.Железный, Ю. В. Семенюк, А. Г. Никулин, Н. Н. Лукьянов. // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С. 4–9.

31. **Wang, R.** Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants [Text] / R. Wang, Q. Wu, Y. Wu. // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42, Issue 11. – P. 2111–2117.

32. **Рудяк, В.Я.** Современное состояние исследований вязкости наножидкостей [Text] / В. Я. Рудяк. // Вестник НГУ. – 2015. – Т.10, вып. 1. – С. 5–22.

33. **Xiang-Qi, W.** A Review on Nanofluids – Part I: Theoretical and Numerical Investigations [Text] / W. Xiang-Qi, S. Arun. // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol.25, Issue 4. – P. 613–630.

34. **Meibo, X.** Application of fullerene C_{60} 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.

Отримана в редакції 10.01.2017, прийнята до друку 07.02.2017

Density and viscosity of solutions refrigerant R600a / mineral oil / fullerene C_{60}

S. A. Moroz, N. N. Lukianov, V. P. Zhelezny✉
Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

The results of an experimental study for the temperature and concentration dependencies of the density and viscosity of solutions of R600a / mineral oil HF16-12 / C60 fullerenes are presented in the paper. The density measurements were performed by a pycnometric method in the temperature range 258-353 K. The viscosity was measured by the rolling ball method in the temperature range 253-283 K. Based on obtained experimental data, the effect of admixtures of compressor oil and additives C_{60} fullerenes on the density and viscosity of R600a was analyzed. It was shown that the additives of fullerenes contribute to lowering the viscosity of the working fluid (refrigerant R600a / mineral oil HF16-12) in entire range of experimental parameters. The working fluid R600a / mineral oil HF16-12 / fullerenes C_{60} is recommended for application in domestic refrigeration.

Keywords: *Solutions; Refrigerant; Fullerenes; Experiment; Density; Viscosity; Concentration*

References

1. **Moroz, S.A., Khlieva, O.Ya., Lukianov, N.N., Zhelezny, V.P.** (2016) The influence of the compressor oil viscosity and fullerenes C60 additives in the oil on the energy efficiency of refrigeration compressor system. *Vestnik of the International Academy of Refrigeration*, No.41, 41–46 (in Russian). DOI: http://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-16-1-41-46

2. **Kedzierski, M.A.** (2008) Effect of CuO Nanoparticle Concentration on R134a-Lubricant Pool Boiling Heat Transfer. Micro-Nanoscale Heat Transfer International Conference, 2008: Proceedings Taiwan, N. Y., 1–8. DOI: http://doi.org/10.1115/1.3072926

3. **Azmi, W.H., Sharif, M.Z., Yusof, T.M.** (2017) Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system – A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.,* Vol. 69, 415–428.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.207

4. **Wang, R.** Wu Q., Wu Y. 2010. Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants. *Energy and Buildings*, 42(11), 2111–2117. DOI: http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.023

5. **Chen, H.** Ding Y., Tan C. 2007. Rheological behaviour of nanofluids. *New Jornal of Physics*, 9(10), 367. DOI: http://doi.org/10.1088/1367-2630/9/10/367

6. **Zhu, D.S. Li X.F., Gao J.W., Wang X.J., Li H., Wu Z.J.** (2007) Influence of SDBS on viscosity for aluminium nanosuspensions. *International Congress of Refrigeration* 2007, 1–7.

7. **Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Schuchmann, H.P., Tavman, S.** (2008) Experimental investigation of viscosity and thermal conductivity of suspensions containing nanosized ceramic particles. *International Scientific Journal*, 34(2), 99–104.

8. **Guzey, D.V., Minakov, A.V., Rudyak, V. Ya., Dekterev, A.A.** (2014) Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid on the basis of copper oxide in a cylindrical channel *Letters in ZTF*, 40(5), 34-42 (in Russian).

9. **Wang, X., Xu, X., Choi, S.** (1999) Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 13(4), 474–480. DOI: https://doi.org/10.2514/2.6486

10. **Anoop, K.B.** Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration [Text] / K.B. Anoop, S. Kabelac, T. Sundararajan, S.K. Das. // J. Appl. Phys. – 2009. Vol.106, Issue 3. – P. 0.34909. doi: 10.1063/1.3182807

11. **Murshed Sohel, S.M.** Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids [Text] / S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang. // Int. J. Therm. Sci.– 2008. – Vol.47, Issue 5. – P. 560–568. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004

12. **Murshed Sohel, S.M.** Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics [Text] / S.M.S. Murshed, S. Tan, N. Nguyen // Journal of Physics. – 2008. – Vol.41, Issue 8. – P. 1–5.

13. **Chandrasekar M.** Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3/ water nanofluid [Text]/ M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol.34, Issue 2. – P. 210–216. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2009.10.022

14. **Timofeeva, E.V.** Nanofluids for heat transfer: an engineering approach [Text] / E.V. Timofeeva, W. Yu, D.M. France, D. Singh, J.L. Routbort // Nanoscale Res. Lett. – 2011. – Vol. 6, Issue 182. – P. 1–7. DOI: 10.1186/1556-276X-6-182.

15. **Prasher, R.** Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications [Text] / R. Prasher, D. Song, J. Wang, P. Phelan. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89, Issue 13. – P. 133108. doi: 10.1063/1.2356113

16. **Chen, H.** Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids [Text] / H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan. // Chem. Phys. Lett. – 2007. – Vol.444. – P. 333–337. doi: 10.1016/j.cplett.2007.07.046

17. **Chen, H.** Rheological behaviour of nanofluids [Text] / H. Chen, Y. Ding, C. Tan. // New J. Phys. – 2007. – Vol.9, Issue 367 – P. 1-24. doi: 10.1088/1367-2630/9/10/367

18. **Kole, M.** Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant [Text] / M. Kole, T. Dey. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2010. – Vol.43, Issue 31 – P. 677–683. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009

19. **Namburu, P.** Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids [Text] / P. Namburu, D. Kulkarni, A. Dandekar, D. Das. // Micro Nano Lett. – 2007. – Vol.2, Issue 3. – P. 67–71. doi: 10.1049/mnl:20070037

20. **Namburu, P.** Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture [Text] / P. Namburu, D. Kulkarni, D. Misra, D. Das. // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2007. – Vol. 32. – P. 397–402. DOI: 10.2298/TSCI140616025K

21. **Garg, J.** Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid [Text] / J. Garg, B. Poudel, M. Chiesa. // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol.103, Issue 7. – P. 1–6. DOI: 10.1063/1.2902483

22. **Nguyen, C.** Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – hysteresis phenomenon [Text] / C. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy. // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, Issue 6. – P. 1492–1506. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.009

23. **He, Y.** Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe / Y. He, Y. Jin, H. Chen // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 2272–2281. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024

24. **Chevalier, J.** Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels [Text] / J. Chevalier, O. Tillement, F. Ayela. // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 91. doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.2821117

25. **Pastoriza-Gallego, M.** CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity [Text] / M.Pastoriza-Gallego, C. Casanova, J. Legido, M. Piñeiro. // Fluid Phase Equilib. – 2011. – Vol. 300. – P. 188–196. DOI: 10.1186/1556-276X-6-221

26. **Lu, W.** Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method [Text] / W. Lu, Q. Fan. // Eng. Anal. Boundary Elem. – 2008. – Vol. 32. – C. 282–289. doi: 10.1016/j.enganabound.2007.10.006

27. **Nguyen, C.** Viscosity data for Al_2O_3–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable [Text] / C. Nguyen, F. Desgranges, N. Galanis // Int J. Therm. Sci. – 2008. – Vol. 47, Issue 2. – C. 103–111. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.033

28. **Zhelezny, V.P.** A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oilAl_2O_3 and R600a-mineral oil-TiO_2. Thermophysical properties. [Text] / V.P. Zhelezny, N.N. Lukianov, O.Ya. Khliyeva, A. S. Nikulina, A.V. Melnyk // Int. J. Refrigeration. – 2008. – Vol. 74. – P. 486-502. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.11.008

29. **Nikulin, A.G.** The experimental unit for investigation of pure liquids and solutions pool boiling process [Text] / A.G. Nikulin, Yu. V. Semenyuk, N.N. Lukianov. // Refrigeration technology and technology. - 2013. - Vol. 4, Issue 144. - P. 12-18. (in Russian).

30. **Zhelezny, V.P.** Methodical features of the experimental study of the processes of nanofluids pool boiling [Text] / V.P. Zhelezny, Yu. V. Semenyuk, A.G. Nikulin, N.N. Lukianov. // Vestnik of the International Academy of Refrigeration. - 2014. - Vol. 3. - P. 4-9. (in Russian).

31. **Wang, R.** Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants [Text] / R. Wang, Q. Wu, Y. Wu. // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42, Issue 11. – P. 2111–2117. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.06.023

32. **Rudyak, V.Ya.** Modern status of researches of nanofluids viscosity [Text] / V. Ya. Rudyak. // Bulletin of NGU. - 2015. - Vol.10, Issue 1. - P. 5-22. (in Russian).

33. **Xiang-Qi, W.** A Review on Nanofluids – Part I: Theoretical and Numerical Investigations [Text] / W. Xiang-Qi, S. Arun. // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol.25, Issue 4. – P. 613–630.

34. **Meibo, X.** Application of fullerene C_{60} 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

Received 10 January 2017
Approved 07 February 2017
Available in Internet 17 March 2017