УДК532.13; 661.725.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ ИЗОПРОПИЛОВОГО СПИРТА С НАНОЧАСТИЦАМИ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ**

**В.З. Геллер, В.О. Грушко, Н.А. Шимчук**

Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. Мартыновского В.С.Одесской

национальной академии пищевых технологий, г. Одесса, Украина

**vladimirgeller11@gmail.com**

Результаты исследований свойств нанофлюидов (жидкостей с добавкой наночастиц), опубликованные в последние годы, показывают возможность существенного целенаправленного изменения их теплофизических и теплообменных характеристик по сравнению с традиционными рабочими веществами холодильных систем и систем кондиционирования воздуха. В ряде работ получено значительное увеличение теплопроводности (λ) и коэффициентов теплоотдачи при различных режимах течения в каналах различной формы и при фазовых переходах не только для нанофлюидов с наночастицами, обладающими высокой теплопроводностью (углеродные нанотрубки – λ = 3000 Вт/м·К, наночастицы высокотеплопроводных металлов, как например, золото или медь – λ = 300÷400 Вт/м·К), но и для нанофлюидов с наночастицами окислов металлов (λ=20÷40 Вт/м·К). Возможность улучшения энергетических характеристик холодильных систем за счёт этого эффекта в настоящее время изучается.

Существуют и другие, пока менее исследованные преимущества нанофлюидов по сравнению с традиционными рабочими веществами холодильных машин. Так в работе [1] показано, что наночастицы TiO2 могут быть использованы в качестве добавки для повышения растворимости минерального масла с HFC-хладонами, при этом улучшается возврат масла в компрессор и энергетические характеристики холодильной системы не уступают СОР системы, использующей HFC-хладоны (в частности, R134а) и синтетические масла. Аналогичный результат был получен в работах [2, 3] и при сравнении СОР холодильных систем, использующих R134а/РОЕ масло и R134а/минеральное масло с наночастицами TiO2. В работе [4] показано, что замена R134а/РОЕ масло на R134а/минеральное масло с наночастицамиAl2O3 приводит к уменьшению потребляемой холодильной машиной энергии на 2,4% и увеличению СОР на 4,4%, а в работе [3] получено уменьшение энергопотребления и увеличению СОР на 26% при добавлении 0,1% масс. наночастиц TiO2 или Al2O3 по сравнению с традиционной системой R134а/РОЕ масло. В работе [5] обнаружено существенное улучшение растворимости минерального холодильного масла при добавлении наночастиц NiFe2O4 с хладонами R134a, R407C и R410А и в системах кондиционирования воздуха, при этом замена масла на основе полиолэстеров на минеральное масло с наночастиц NiFe2O4 привела к увеличению СОР на 6%. Согласно данным [6], использование хладона R600a с наночастицамиTiO2 приводит к уменьшению энергопотребления на 9,6%. Возможные причины указанного эффекта, заключаются в улучшении характеристик трения в компрессоре и увеличении коэффициентов теплоотдачи в испарителе и конденсаторе. Однако, детально эти причины исследованы не были.

Вязкость также является важной характеристикой для дизайна и оптимизации технологических теплообменных аппаратов, в которых циркулирует поток теплоносителя, поскольку это свойство определяет затраты энергии на прокачку теплоносителей и значительно влияет на эффективность процессов теплообмена. Вместе с тем, экспериментальные исследования вязкости нанофлюидов, проведенные к настоящему времени, весьма ограничены и разноречивы. Существующие методы расчёта вязкости нанофлюидов базируются, в основном, на модификациях модели Эйнштейна [7], в которой для расчета приведенной динамической вязкости η/η0 (где η0 – вязкость базовой жидкости) суспензий со сферическими твердыми частицами использованы феноменологические уравнения гидродинамики. Обзор этих модификаций, учитывающих несферичность наночастиц и их взаимодействие между собой, приведен в работе [8]. Проблемой этих уравнений является отсутствие универсальности (они применимы только к конкретным приложениям, например, наночастицы Al2O3 в воде) и физического смысла.

На рис. 1 в диаграмме приведенная динамическая вязкость – объёмная концентрация наночастиц представлены сравнения некоторых экспериментальных данных для систем вода/Al2O3 и этиленгликоль/Al2O3, а также расчёта по классической модели Эйнштейна (А) и моделям Эйнштейна (B) и Бетчелора (C) [8], использующим эффективную концентрацию наночастиц.



Рис.1. Зависимость приведенной вязкости от объёмной концентрации наночастиц

1 –A, 2 – этиленгликоль/Al2O3 (28 nm) [9], 3 – вода/Al2O3 (28 nm) [9], 4 – этиленгликоль/Al2O3(25 nm) [10], 5 – B, 6 – вода/Al2O3(25 nm) [10], 7 – С

Как видно из рис. 1, приведенная вязкость системы вода/Al2O3 по данным работ [9] и [10] при объёмной концентрации наночастиц 5% отличается в 5 раз при практически одинаковом размере наночастиц. Главными причинами столь существенных расхождений являются различные методики приготовления нанофлюидов и их нестабильность во времени (агломерация и выпадение наночастиц в осадок).

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование влияния наночастиц окиси алюминия на вязкость изопропилового спирта. При подготовке исследуемых образцов нанофлюидов особое внимание было уделено обеспечению их устойчивости во времени. Для системы изопропиловый спирт/Al2O3 исходная концентрация наночастиц Al2O3 составляла 20% масс. До нужной концентрации эта смесь разбавлялась чистым изопропанолом, затем гомогенизировалась с использованием ультразвукового диспергатора и центрифугировалась. Средний размер наночастиц был определен методом динамического рассеяния света (лазерной корреляционной спектроскопии) и составил 50 нм.

Для измерения вязкости использован капиллярный метод (стеклянные вискозиметры типа ВПЖ-4). Вискозиметры были помещены в стеклянный сосуд Дьюара, температура в котором поддерживалась постоянной за счет прокачивания через теплообменник термостатирующей жидкости от термостата типа U-10. Для измерений использовались вискозиметры с диаметром капилляров 0,62 и 0,82 мм. Измерения проводились в диапазоне температур 30÷70 °С. Температура опыта определялась с помощью ртутного лабораторного термометра с ценой деления 0,1 К. Погрешность результатов измерений вязкости нанофлюидов не превышала 1,2%. Результаты измерений кинематической вязкости (ν) и расчёта динамической вязкости (η) системы изопропиловый спирт/Al2O3 (xм – массовая концентрация наночастиц) приведены в табл. 1. Значения плотности для расчёта динамической вязкости определялись, согласно рекомендациям [11], путём аддитивного комбинирования удельных объёмов изопропилового спирта и Al2O3.

Таблица 1

Вязкость изопропилового спирта с наночастицами Al2O3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| t, oC | xм = 0,12% | xм= 5,0% | xм = 11,1% |
| ν∙106, м2/с | η∙103, Па·с | ν∙106, м2/с | η∙103, Па·с | ν∙106, м2/с | η∙103, Па·с |
| 30,0 | 2,42 | 1,03 | 4,18 | 1,85 | 6,00 | 2,81 |
| 50,0 | 1,45 | 1,04 | 2,33 | 1,74 | 3,39 | 2,67 |
| 70,0 | 0,948 | 1,06 | 1,37 | 1,59 | 1,91 | 2,34 |

Для описания полученных данных о кинематической вязкости составлено уравнение, позволяющее рассчитывать вязкость при различных температурах и концентраціях

, (1)

где a00=7,001∙10-1, a01=6,434∙10-2, a02=-2,074∙10-3, a10=-1,080∙10-2,a11=-2,740∙10-4, a12=1,088∙10-5; хм – массовая концентрация наночастиц, %; t – температура, °С.

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета показало, что расхождения не превышают 4%.

Динамическая вязкость была обработана в виде зависимости приведенной вязкости η/η0 от объёмной концентрации наночастиц (рис. 2).



Рис. 2.Зависимости приведенной вязкости η/η0 от объёмной концентрации наночастиц

1 – 30°С, 2 – 50°С, 3 – 70°С.

Как видно, изотермы приведенной динамической вязкости расслаиваются, т.е. эффект влияния наночастиц на вязкость зависит от температуры. Этот вывод согласуется с результатами исследования [12], проведенного в Национальном институте стандартов и технологий (США) методом вискозиметра с вибрирующим зондом для синтетического холодильного масла с наночастицами окиси меди. Возможно, с увеличением температуры и подвижности молекул кластеры наночастиц начинают распадаться, что приводит к уменьшению эффекта влияния наночастиц на вязкость базовой жидкости.

Для описания этого эффекта модель Эйнштейна была модифицирована путём введения температурной функции

 (2)

где xоб – объёмной концентрации наночастиц, %; t – температура, °С.

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета по уравнению (2) показало, что расхождения не превышают 3%.

**Список литературы:**

1. Elcock D. Potential impacts of nanotechnology on energy transmission applications and needs / Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. 2007. P.27 – 35.

2. Wang R. A refrigerating system using HFC134a and mineral lubricant appended with n-TiO2(R) as working fluids / Wang R, Xie H. // In: Proceedings of the 4th International Symposium on HAVC, Tsinghua University. 2003. P. 888 – 892.

3. Bi S. Application of nanoparticles in domestic refrigerators / Bi S., Shi L, Zhang L. // Applied Thermal Engineering. 2008. №28. P. 1834 – 43.

4. Peng H. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube / Peng H., Ding G., Jiang W. et al. // International Journal of Refrigeration. 2009. №32. P. 1259-1270.

5. Wang R. Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants // WangR., WuQ., WuY. / Energy Buildings. 2010. Vol. 42 (11). P. 2111 – 2117.

6. Bi S. Performance of a domestic refrigerator using TiO2-R600a nano-refrigerant as working fluid / Bi S., GuoK., LiuZ., WuJ. // Energy Conversion and Management. 2010. P. 306 – 311.

7. Einstein A. Investigation on theory of Brownian motion / Dover, New York. 1956. 119 p.

8. Wang X. A review on nanofluids – Part I: Theoretical and numerical investigations / Wang X., Mujumdar A. // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2008. Vol. 25. No 4. P. 613 – 630.

9. Wang X. Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture / Wang,X.,XuX., ChoiS. //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1999. №13. P. 474 – 480.

10 Turgut A. Preparation and characterization of nanofluids containing alumina particles / TurgutA., TavmanI., Cetin L. et al. // Proceedings of the International Symposium on Thermal and Materials Nanoscience and Nanotechnology / Antalya, Turkey. 2011. P. 192 – 200.

11. Wasp E. Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation // Wasp E., Kenny J., Gandhi, R. / Series on Bulk Materials Handling. 1977. 1 (4). P. 56 – 58.

12. Kedzierski M.Viscosity and density of CuOnanolubricant / International journal of refrigeration. 2012. №35. P. 1997 – 2002.