

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ВЯЗКОСТИ КОМПРЕССОРНОГО МАСЛА ISO 9 С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ TiO₂ И Cu

**Грушко В.О., аспирант, Зброжек В.О., аспирант, Геллер В.З., д-р тех. наук, профессор
Одесская государственная академия холода, г. Одесса**

В статье представлены конструкции экспериментальных стендов и результаты экспериментального исследования температурной зависимости вязкости и теплопроводности наномасел. В качестве объекта исследования выбран раствор нанопорошков TiO₂ (~10 нм) и Cu (~50 нм) в компрессорном масле ХМИ Азмол, которое применяется при производстве бытовой холодильной техники. Приведены экспериментальные данные и выполнен анализ влияния наночастиц на теплофизические свойства компонентов рабочего тела для бытовой холодильной техники.

This paper presents construction of the experimental stands and experimental data for the temperature dependence viscosity, thermal conductivity of the nanolubricants. Solutions of the nano-powders TiO₂ (~10 nm) and Cu (~50 nm) in the compressor oil HMI Azmol was chosen as the object of research. Analysis of the influence of nanoparticles on the thermal properties of the compressor oil for the domestic refrigeration was carried out.

Ключевые слова: наномасло, наночастицы, эксперимент, теплопроводность, вязкость, концентрация.

I. Введение. В настоящее время включение наночастиц в состав рабочего тела компрессорной системы начинает рассматриваться как один из перспективных методов повышения показателей эффективности холодильной техники [1,2]. Наиболее часто наночастицы добавляют в компрессорные масла, которые в свою очередь являются необходимым компонентом реального рабочего тела (РРТ) в холодильном оборудовании [3]. При этом 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 теплообменных процессов в испарителе. Вместе с тем, информации о влиянии наночастиц на теплопроводность и вязкость в литературе приведено мало, а сами данные пока не позволяют приступить к обобщению полученной информации.

С целью изучения указанных проблем в Одесской государственной академии холода были разработаны экспериментальные установки и проведены исследования вязкости и теплопроводности чистого компрессорного масла ISO 9, а также данного масла с добавкой наночастиц TiO₂ (10 нм) и Cu (50 нм).

II. Краткий обзор экспериментальных данных. Проведенный обзор опубликованных работ показал, что добавление различных наночастиц в базовое вещество приводит к увеличению его теплопроводности и на вязкости. Чаще всего в жидкость добавляют наночастицы меди, алюминия, железа и их оксидов, а также углеродные нанотрубки. Размер наночастиц, как правило, находится в пределах 4...150 нм.

Фрагмент опубликованных данных по влиянию наночастиц на теплопроводность и вязкость приведены в табл. 1 и 2.

Анализ выполненных исследований показывает, что увеличение теплопроводности и вязкости является характерной особенностью для различных типов нанодисперсий. Этот эффект зависит от размера, материала и концентрации наночастиц, а также вида базового вещества.

Таблица 1 – Обзор опубликованных данных по теплопроводности нанодисперсий

Автор	Система*	Размер частиц, нм	Концентрация наночастиц, объем %	Полученный эффект, %
Choi [4]	ТМ/УН	25÷50000	1	+160
Kartheyan [5]	ЭГ/CuO	8	0÷1	+54
Liu [6]	ЭГ/CuO	29	5	+23
Hwang [7]	ЭГ/CuO	33	1	+9
Hong [8]	Fe /ЭГ	10	0,55	+18%
Murshed [9]	TiO ₂ /ЭГ	15	5	+18%
	Al/ЭГ	80	5	+45%

Примечание: * ЭГ — этиленгликоль, УН — углеродные нанотрубки, ТМ — трансформаторное масло

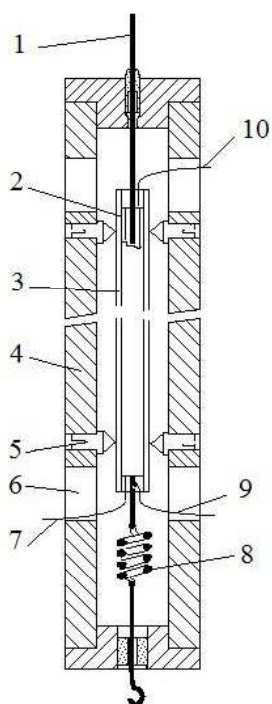
Таблиця 2 – Обзор опубликованных данных по вязкости наноплюидов

Автор	Система*	Размер частиц, нм	Концентрация наночастиц, объем %	Полученный эффект, %
Tavman [10]	SiO ₂ / вода Al ₂ O ₃ / вода	12 30	0,45 ÷ 4 0,5 ÷ 1,5	+540 +178
Praveen [11]	CuO / раствор ЭГ и воды	29	1 ÷ 6,12	+450
Kedzierski [12]	CuO / RL68H	30	2,9 ÷ 39,2	+378
ZHU [13]	Al / вода	18 ÷ 50	0,04 ÷ 0,16	+110
Haisheng [14]	TiO ₂ / ЭГ	25	0,5 ÷ 8	+22

* ЭГ — этиленгликоль, RL68H — синтетическое полиэстерное масло

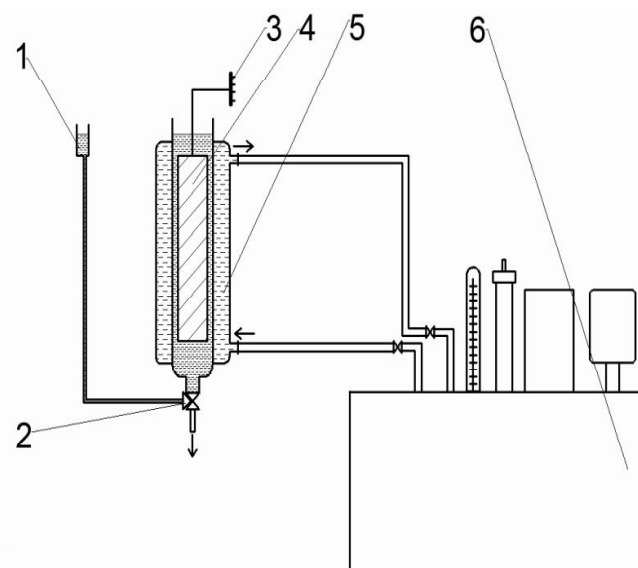
III. Экспериментальные исследования

3.1. Теплопроводность. Теплопроводность чистого масла ХМИ Азмол, а также наномасел Азмол +TiO₂ и Азмол+Cu измерялась при помощи стационарного метода нагретой нити. Конструкция измерительной ячейки, а также схема экспериментальной установки для исследования теплопроводности показана на рис. 1, 2.



1 – платиновая нить; 2 – платиновый капилляр; 3 – стеклянный капилляр; 4 – латунный каркас; 5 – центровочные винты; 6 – смотровое окно; 7, 9, 10 – токовые и потенциальные отводы от нити и капилляра; 8 – вольфрамовая пружина

Рис. 1 – Конструкция измерительной ячейки



1 – заправочный шприц, 2 – трехходовой вентиль, 3 – токовые и потенциальные провода, 4 – измерительная ячейка, 5 – проточный стеклянный теплообменник, 6 – термостат

Рис. 2 – Схема экспериментальной установки для исследования теплопроводности

Отличительной особенностью измерительного устройства является использование тонкостенного платинового капилляра (внутренний диаметр 1,1 мм, толщина стенки 0,05 мм, длина 82 мм) в качестве наружного термометра сопротивления. В качестве внутреннего термометра сопротивления использовалась платиновая проволока диаметром 0,1 мм. Платиновый капилляр помещен внутри стеклянного капилляра, обеспечивающего его жесткость и возможность центрирования капилляра относительно нити. Центрирование осуществлялось с помощью специального каркаса, изготовленного из латуни и имеюще-

го центрирующие винты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Это позволило при измерениях свести к минимуму поправку на эксцентриситет нити.

В верхней части каркаса центральная нить запаяна в стеклянном капилляре, имеющим внутренний диаметр 0,1 мм, а в нижней части нить подсоединена к вольфрамовой пружине, установленной в специальном натяжном устройстве. Это обеспечивало постоянное во времени и независящие от температуры натяжение нити. Потенциальные отводы от нити изготовлены из платиновой проволоки диаметром 0,02 мм, припаяны к нити золотом и выведены из рабочей зоны по изотермам. Токовые и потенциальные провода капилляра изготовлены из платиновой проволоки диаметром, соответственно 0,15 и 0,02 мм. При конструировании измерительной ячейки форма и размер каркаса были подобраны таким образом, что бы обеспечить минимальные зазоры и тем самым исключить конвекцию вне рабочего участка.

Измерительная ячейка помещена в стеклянный теплообменник (рис. 2), через который с помощью термостата прокачивается термостатирующая жидкость. Термостат обеспечивал поддержание температуры постоянной с отклонениями не более $\pm 0,01$ К в требуемом диапазоне температур.

Расчет теплопроводности производился по формуле (1).

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) I^2 R}{2\pi l \Delta T}, \quad (1)$$

где d_2 — внутренний диаметр капилляра;

d_1 — диаметр нити;

l — длина рабочего участка нити;

I — сила тока в цепи нити;

R — сопротивление нити;

ΔT — разность температур между нитью и капилляром.

Температуры обоих термометров сопротивления определялись компенсационным методом, при этом измерения разности потенциалов на самих термометрах и образцовых катушках сопротивления осуществлялись при помощи цифрового вольтметра RIGOL DM3064 с погрешностью не более ± 10 nV.

Геометрическая константа измерительной ячейки была проверена экспериментами с использованием стандартных справочных данных для толуола [15]. Отклонение результатов измерений теплопроводности толуола от стандартных справочных данных (рис. 3) не превышало $\pm 0,8$ %.

Теплопроводность была рассчитана с учетом поправок на концевые эффекты, эксцентриситет нити и перенос тепла излучением. Сумма этих поправок не превышает $\pm 0,5$ % от измеряемой теплопроводности.

Все опыты проводились на 2–3 перепадах температур в слое жидкости (от 4 до 12 К), при этом значения $Ra = Gr \cdot Pr$ не превышали 800 во всех экспериментах. Это свидетельствует об отсутствии влияния конвекции на результаты измерений. Расчетные погрешности опытных данных не превышали ± 1 %.

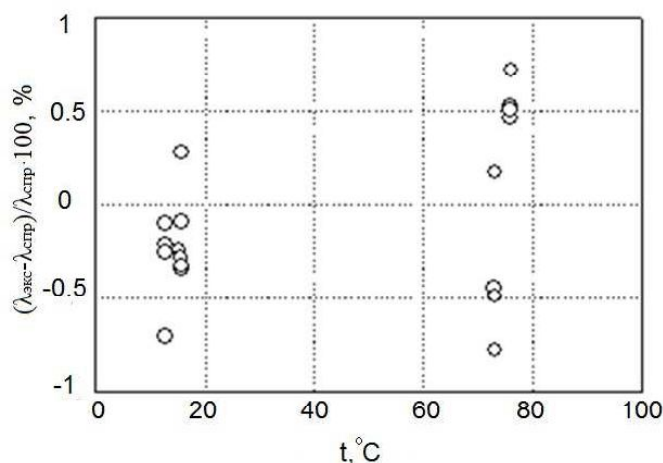


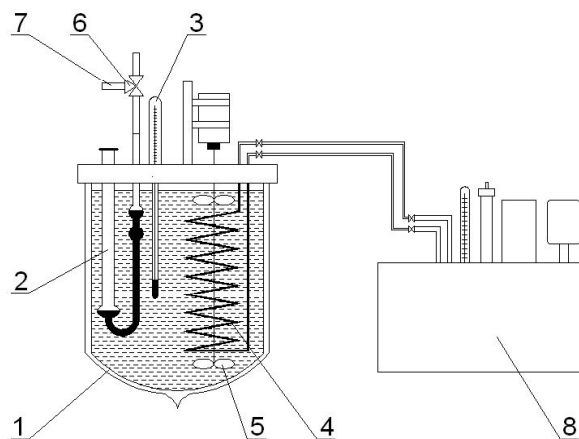
Рис. 3 – Отклонение результатов измерений теплопроводности толуола от стандартных справочных данных

3.2. Вязкость. Кинематическая вязкость измерялась капиллярным методом (стеклянный вискозиметр ВПЖ–4). Были использованы два вискозиметра с диаметрами капилляров 0,82 и 1,12 мм. Вязкость рассчитана по формуле

$$v = \frac{g}{9,807} \cdot t \cdot K, \quad (2)$$

где v — кинематическая вязкость,
 g — ускорение свободного падения,
 t — среднее время истечения,
 K — константа вискозиметра.

Схема экспериментальной установки для измерения вязкости приведена на рис. 4.



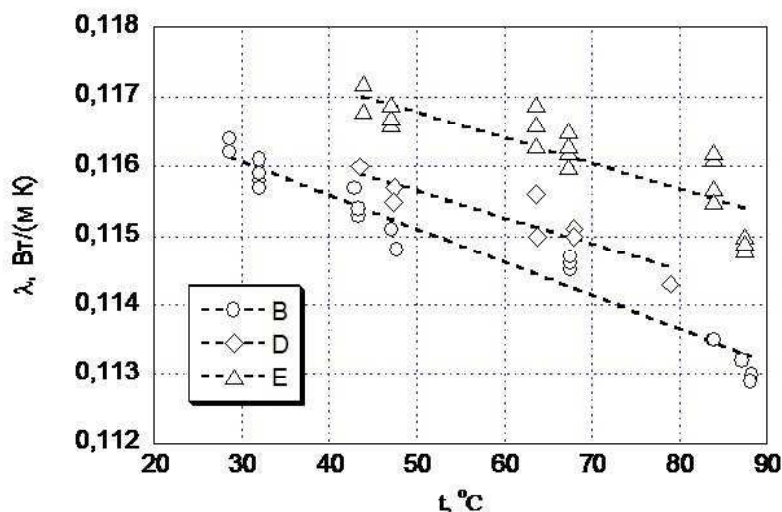
1 — стеклянный сосуд Дьюара, 2 — вискозиметр ВПЖ-4,
 3 — контрольный ртутный термометр, 4 — теплообменник, 5 — мешалка,
 6 — трехходовой вентиль, 7 — трубопровод к вакуумному насосу, 8 — термостат

Рис. 4 — Экспериментальный стенд для измерения вязкости

Вискозиметр установлен внутри стеклянного сосуда Дьюара, в котором температура поддерживалась в пределах $\pm 0,02$ К.

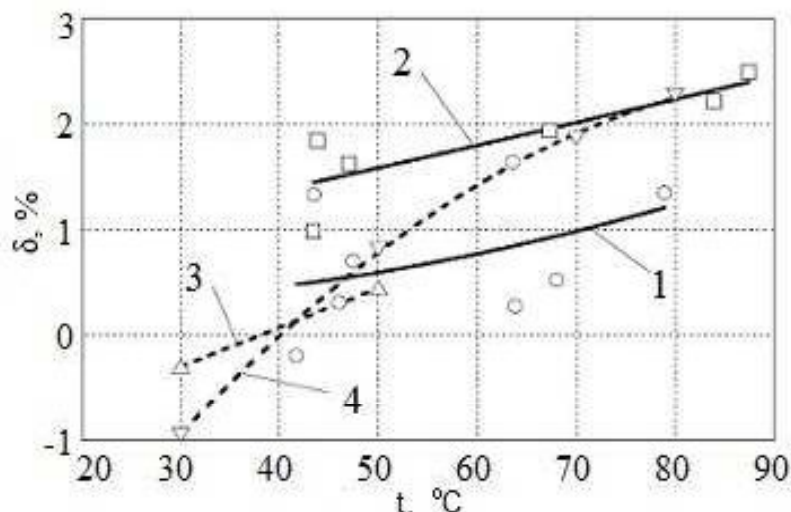
Расчетная погрешность в экспериментальных данных о вязкости не превысила $\pm 0,8$ %.

IV. Результаты экспериментального исследования. Все измерения проводились в интервале температур $20 \div 100$ °С при концентрациях наночастиц TiO_2 и Cu 0,008 % и 0,1 %, соответственно. Результаты измерений теплопроводности представлены на рис. 5, а отклонения экспериментальных данных о теплопроводности и вязкости компрессорного масла с наночастицами от данных для чистого масла — на рис. 6.



B — чистое масло; D — масло+ TiO_2 ; E — масло+ Cu

Рис. 5 — Данные о теплопроводности компрессорного масла



1 – теплопроводность масла + TiO_2 , 2 – теплопроводность масла + Cu ,
3 – вязкость масла + TiO_2 , 4 – вязкость масла + Cu

Рис. 6 – Отклонения экспериментальных данных теплопроводности и вязкости компрессорного масла с наночастицами от данных для чистого масла

Выводы

Разработана новая конструкция измерительной ячейки для измерения теплопроводности стационарным методом нагретой нити. Впервые получены экспериментальные данные о теплопроводности и вязкости чистого холодильного компрессорного масла ISO 9, а также этого масла с добавками наночастиц TiO_2 (10 нм) и Cu (50 нм) с концентрацией 0,008 % и 0,1 %, соответственно, в диапазоне температур от 20 до 100 °С. Показано, что присутствие наночастиц увеличивает теплопроводность и вязкость масла на 1,5...2,5 %.

Литература

1. Kedzierski M.A. AEffect of CuO Nanoparticle Concentration on R134a-Lubricant Pool Boiling Heat Transfer // Micro-Nanoscale Heat Transfer International Conference. – Proceedings Taiwan – N. Y : – 2008. – P.1-8.
2. Wang R., Wu Q., Wu Y. Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydro-fluorocarbons refrigerants // Energy and Buildings. – 2010. – № 42. – P. 2111-2117.
3. Zhelezny V.P., Nichenko S.V., Semenyuk Yu.V., Kosoy B.V., Ravi Kumar. Influence of Compressor Oil Admixtures on Efficiency of a Compressor system // Int. J. Refrig. – 2009. – № 32(7). – P. 1526-1535.
4. Choi S.U.S. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotubes suspensions. // Applied Physics Letters. – 2001. – № 79. – P. 2252-2254.
5. Karthikeyan N.R Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids // Materials Chemistry and Physics. – 2008. – № 109. – P. 50-55.
6. Liu M.S. Enhanced thermal conductivity with CuO for nanofluids // Chemical Engineering and Technology. – 2006. – №29. – P.72-77.
7. Hwang Y. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids // Current Applied Physics – № 6S1. – 2006. – P. 67-71.
8. Hong T. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids //Journal of Applied Physics. – 2005. – № 97. – P. 064311-1–064311-4.
9. Murshed S.M.S. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – V. 47. – Is. 5. – P. 560-568.
10. Tavman I., Turgut A., Chirtoc M., Schuchmann H., Tavman S. Experimental investigation of viscosity and thermal conductivity of suspensions containing nanosized ceramic particles // International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering – Volume 34 – 2008 – P. 99-104. Trisaksri Visinee // Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids – P.513-522.

11. Praveen K., Namburu, Devdatta P., Kulkarni, Debasmita M., Debendra K. Das Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2007. – № 32. – P. 397-402.
12. Kedzierski M. Viscosity and density of CuO nanolubricant // *Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants*. – 2009. – P. 1-8.
13. Zhu D.S. Influence of sdbos on viscosity for aluminium nano-suspensions // *International Congress of Refrigeration*. – 2007. – P. 1-6.
14. Haisheng C., Yulong D., Chunqing T. Rheological behaviour of nanofluids // *New Journal of Physics*. – 2007. – № 9. – P. 367.
15. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзианов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 203-205.

УДК 536.71

СТРАТЕГИЯ ОТБОРА БИНАРНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ С НИЗКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

¹Бодарев Д.А., ¹Арменко С.В., д-р техн. наук, ст. н. сотр.,
²Хмельнюк М.Г., д-р техн. наук, профессор, ²Мазур В.А., д-р техн. наук, профессор
¹Одесский национальный морской университет, г. Одесса
²Одесская государственная академия холода, г. Одесса

Приведена стратегия выбора рабочих тел с заранее заданной комбинацией таких свойств, как термодинамическая эффективность, парниковый эффект, пожаробезопасность, нетоксичность, хорошие эксплуатационные характеристики и др. Рассмотрена задача оптимизации как проблема нечеткого нелинейного программирования, в котором локальные критерии представлены нечеткими множествами. Для принятия окончательного решения использована модель Беллмана–Заде. Показано, что проблема выбора компромиссного решения среди большого разнообразия возможных двух- и многокомпонентных смесей может быть решена с помощью разработки хладагентов из натуральных и синтетических компонентов.

The strategy of a choice of working bodies with the beforehand given combination of such properties is given, as the thermodynamic efficiency, good operational characteristics etc. Considered a task of optimization as a problem of indistinct nonlinear programming, in which the local criteria are submitted by indistinct sets. For acceptance of the final decision the model Bellmana–Zade is used. Is shown, that the problem of a choice of the conciliatory proposal among the large variety of possible two and multicomponent mixes can be decided with the help of development of coolants from natural and synthetic components.

Ключевые слова: холодильный агент, термодинамическая эффективность, парниковый эффект, смесь, локальные критерии.

Дальнейшее использование таких распространенных хладагентов, как R410A, R32, R744 и R170 сдерживается высоким потенциалом глобального потепления и/или низкой критической точкой. До тех пор, пока существуют высокотемпературные альтернативы и возможности для снижения GWP, использование чистых веществ в качестве хладагентов не является приемлемым решением. С другой стороны, большинство смесей, которые отвечают требуемым критериям, оказываются зеотропными смесями с неприемлемым температурным скольжением. Исходя из этого противоречия, очевидно, что азеотропные или квазиазеотропные бинарные хладагенты IV поколения, сочетающие высокую энергетическую эффективность и низкие потенциалы глобального потепления обладают хорошими перспективами для широкого использования в холодильной промышленности.

Задача выбора рабочих сред не имеет универсального решения и, в зависимости от различных экономических, экологических и политических требований, критерии отбора веществ непрерывно изменяются во времени. Примером может служить эволюция рабочих сред в технологиях производства искусственного холода. Первое поколение хладагентов (SO₂, NH₃) просуществовало около ста лет (1830–1930 гг.) и отвечало единственному требованию — любым путем достигнуть понижения температуры. С улучшением качества жизни населения произошел переход ко второму поколению хладагентов (1930–1990 гг.), которые обеспечили безопасность и долговечность работы холодильного оборудования. Угроза разрушения озонового слоя поставила задачу устранения галогеносодержащих хладагентов второго по-