



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
член-корр. РАН Маркович Д.М.

07 2017г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Исследование теплопроводности и вязкости наножидкостей» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Морозова Марина Анатольевна (девичья фамилия Серебрякова) работала в лаборатории разреженных газов ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН в должности инженера-исследователя.

В 2013 году Морозова Марина Анатольевна окончила магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) по направлению «Физика» по специальности «Физика кинетических явлений».

С 2013 года Морозова Марина Анатольевна обучалась в аспирантуре Института теплофизики СО РАН по специальности 01.04.14 «теплофизика и теоретическая теплотехника». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2017 г. Институтом теплофизики СО РАН.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Новопашин Сергей Андреевич работает в должности заведующего лабораторией разреженных газов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы

С развитием высокоэнергичных технологий и ростом мощности электронных устройств возникает необходимость создания эффективных охлаждающих систем и управления большими тепловыми потоками. Один из способов провести интенсификацию теплообмена - улучшить теплофизические характеристики теплоносителя, повысив теплопроводность жидкости путём добавления твёрдых частиц с высокой теплопроводностью. Особый интерес при создании таких систем представляют наножидкости, так как в отличие от частиц микронного размера наночастицы медленнее осаждаются, не приводят к засорению и износу каналов, по которым движутся, и подавляют турбулентность в меньшей степени. Возможность использования наножидкостей в качестве рабочих элементов является перспективным методом создания новых теплоэнергетических установок, установок по транспортировке тепловой энергии, различных МЭМС-систем, что инициировало проведение многочисленных исследований в лабораториях по всему миру. Создание такого материала как core-shell частицы

(частицы, состоящие из ядра и одной или нескольких оболочек) позволило существенно расширить области применения наножидкостей. Особое место наножидкости на основе таких материалов занимают в биологии и медицине, где они применяются в технологиях транспортной доставки лекарств и гипертермии.

Однако, несмотря на многочисленные исследования в течение последних двух десятилетий, многие полученные к настоящему времени экспериментальные данные для теплопроводности наножидкостей имеют большой разброс и зачастую противоречат теоретическим описаниям. При этом наряду с данными об аномально высокой теплопроводности наножидкостей по сравнению с теоретическим описанием наблюдались отклонения от теории и в меньшую сторону. Также часть исследований привели к выводу о том, что теплопроводность наножидкостей с хорошей точностью описывается классической теорией Максвелла. Такой разброс данных объясняется сложностью описания процессов, происходящих в наножидкостях, по сравнению с суспензиями на основе более крупных частиц.

В теоретических исследованиях теплопроводности наножидкостей помимо классической теории Максвелла, были предложены модели, которые учитывают не только зависимость от объемной концентрации наночастиц, но и влияние Броуновского движения наночастиц, их форму, зависимость теплопроводности от температуры, поверхностного заряда и pH системы, а также вклад в увеличение теплопроводности за счёт образования перколяционных цепей из наночастиц.

Так как добавление наночастиц в базовую жидкость наряду с теплопроводностью изменяет все её теплофизические свойства, важной характеристикой является вязкость. Даже аномально высокая теплопроводность наножидкости может оказаться несущественной из-за потерь за счет увеличения энергии, затрачиваемой на прокачку по каналам при её использовании в качестве рабочего элемента в теплообменных устройствах. Поэтому необходимо одновременно исследовать теплопроводность и вязкость наножидкостей. Важно также учитывать реологию исследуемых наножидкостей.

Целью данной работы является совместное исследование теплопроводности и вязкости наножидкостей с учетом контактного теплового сопротивления Капицы на границе частица – жидкость.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Совместно экспериментально исследовать теплопроводность и вязкость наножидкостей.
2. Провести теоретический анализ влияния эффекта Капицы на тепловые процессы в наножидкостях.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружено, что зависимость теплопроводности наножидкостей на основе 10 нм частиц оксида алюминия лежит ниже значений, которые предсказывает теория Максвелла. Эксперименты проведены для трех базовых жидкостей: воды, этиленгликоля и изопропилового спирта.

2. Впервые предложен механизм для описания теплопроводности наножидкостей, связанный с уменьшением потоков тепла на границе частица – жидкость вследствие температурного скачка Капицы.

3. Впервые аналитически решена задача о теплопроводности суспензий на основе сферических частиц в оболочке. Дополнительно аналитически решены две задачи, связанные с теплообменом между сферической частицей и жидкостью с учетом теплового сопротивления Капицы с различными граничными условиями. Анализ показал, что определяющим параметром процессов теплообмена в наножидкостях является безразмерный, параметр, включающий в себя

размер частицы, теплопроводность базовой жидкости и величину контактного сопротивления между жидкостью и материалом частицы.

4. Экспериментально зарегистрировано уменьшение вязкости наножидкости на основе смеси 90% этиленгликоля и 10% воды и наночастиц Al_2O_3 с увеличением скорости сдвига. Обнаружено, что эффект увеличивается с ростом объёмной концентрации наночастиц.

5. Результаты совместного исследования вязкости и теплопроводности показали, что использование исследованных в настоящей работе наножидкостей в качестве эффективного теплоносителя не является перспективным. Причина состоит в существенно более сильном возрастании вязкости по сравнению с теплопроводностью при увеличении объёмного содержания наночастиц.

Достоверность полученных результатов следует из применения отработанных методов исследований, результатов проведения калибровочных и тестовых измерений, оценки величин погрешности и воспроизводимости экспериментальных результатов, а также из проведенного сравнения ряда полученных результатов с уже известными результатами других исследований.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты совместного экспериментального исследования теплопроводности и вязкости наножидкостей, а также теоретического анализа влияния сопротивления Капицы на тепловые процессы в наножидкостях являются полезными при создании эффективных теплоносителей для теплообменных устройств. Результаты теоретического анализа могут быть использованы в медицинских технологиях в методах транспортной доставки лекарств и гипертермии.

Личный вклад соискателя

Вклад автора в исследования состоял в самостоятельном проведении серий экспериментов, обработке, анализе экспериментальных результатов и проведении теоретического анализа в составе научного коллектива. Также автором был проведён обзор литературы, подготовлены статьи для публикации в рецензируемых журналах и доклады для представления работы на конференциях. Цели и задачи были сформулированы совместно с научным руководителем.

Список основных публикаций по материалам диссертации

Статьи Морозовой (Серебряковой) М.А. в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. С.П. Бардаханов, С.А. Новопашин, М.А. Серебрякова, Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия // Наносистемы: физика, химия, математика, 2012, 3 (1), С. 1–7
2. С.А. Новопашин, М.А. Серебрякова, Р.Е. Соколов, А.В. Зайковский, А.В. Окотруб, Д.С. Новопашина, Теплопроводность наножидкости на основе воды и химически модифицированных одностенных углеродных нанотруб // Российские нанотехнологии, № 1-2, 2013. С. 53 – 56
3. Serebryakova M.A., Dimov S.V., Bardakhanov S.P., Novopashin S.A. Thermal conductivity, viscosity and rheology of a suspension based on Al_2O_3 nanoparticles and mixture of 90% ethylene glycol and 10% water //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 83. – С. 187-191.
4. Новопашин С.А., Серебрякова М.А., Хмель С.Я. Методы синтеза магнитных жидкостей //Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 4. С. 411-427.
5. С. А. Новопашин, М. А. Серебрякова, Г. И. Сухинин Влияние температурного скачка Капицы на тепловые явления в наножидкостях // Письма в ЖЭТФ, 2015, том 102, вып. 8, с. 582 – 584.

6. Sukhinin G. I., Serebryakova M. A., Novopashin S. A. Thermal Conductivity of Suspensions Based on Core-Shell Particles // Journal of Heat Transfer. – 2016. – Vol. 138, No. 6. – P. 064501. .
7. Serebryakova M.A., Zaikovskii A.V., Sakhapov S.Z., Smovzh D.V., Sukhinin G.I., Novopashin S.A. Thermal conductivity of nanofluids based on hollow γ -Al₂O₃ nanoparticles, and the influence of interfacial thermal resistance // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – T. 108. – С. 1314-1319.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XLIX Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 16–20 апреля 2011), 18-ая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных, (г. Красноярск, 29 марта 2012 – 05 апреля 2012), XIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (г. Новосибирск, 20 - 23 ноября 2014), 17th International Conference Materials, methods & technologies (Elenite Holiday Village, Bulgaria 7–11 June 2015), International Symposium and School for Young Scientists INTERFACIAL PHENOMENA AND HEAT TRANSFER, (Novosibirsk, Russia, 2-4 of March 2016), 2016 Russia-Japan Conference "Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures" NSU (Novosibirsk, Russia, October 30 – November 3, 2016), XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (г. Новосибирск, 22 – 25 ноября 2016).

Решение о рекомендации к защите

Диссертация «Исследование теплопроводности и вязкости наножидкостей» Морозовой Марины Анатольевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании семинара лаборатории разреженных газов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством академика РАН А.К. Реброва.

Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты голосования: «за» - 13 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 1/5-2017 от «26» мая 2017 г.

Председатель семинара
Ребров А.К.,
академик РАН, советник РАН



Секретарь семинара
Смовж Д.В.,
к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории
разреженных газов ИТ СО РАН

