

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Морозовой Марины Анатольевны

«Теплопроводность и вязкость наножидкостей», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность

Диссертационная работа М. А. Морозовой относится к современной, активно развивающейся области науки и техники - нанотехнологии. Объектом исследования в данной работе являются наножидкости, представляющие особый интерес, в том числе ввиду возможности их использования при создании эффективных охлаждающих систем. Разнообразие параметров наночастиц оказывающих влияние на свойства наножидкостей до сих пор мешают созданию законченных универсальных теоретических моделей описывающих их поведение. В связи с этим, актуальным остается исследование характеристики наножидкостей, таких как теплопроводность и вязкость, проведение анализа полученных экспериментальных данных и, не менее актуально, создание описывающих результаты измерений теоретических моделей на основе существующего научного опыта.

Оценка содержания работы

Диссертация содержит 103 страницы, включая 43 рисунка, и структурно разделена на введение, 5 глав, заключение и список литературы, содержащий 91 наименование.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулирована цель и основные задачи исследования, научная новизна, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, а также выделена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, и дано обоснование их достоверности.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме исследования. Описаны общие характеристики наножидкостей и способы их стабилизации. Подробно рассмотрены теоретические модели для описания теплопроводности и вязкости наножидкостей, а также приведены результаты математического моделирования. Проведён обзор экспериментальных

данных по исследованиям теплопроводности и вязкости наножидкостей. Детально рассмотрено влияние теплового сопротивления Капицы на теплопроводность наножидкостей. В заключении проведена постановка задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приведены характеристики исходных наночастиц, описана методика приготовления наножидкостей, указаны приборы и описаны методы проведения измерений теплопроводности и вязкости наножидкостей, а также приведены результаты калибровочных измерений.

В **третьей главе** экспериментально исследованы вязкость ряда наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия и реология наножидкости на основе оксида алюминия и смеси этиленгликоля и воды. Измерения вязкости были проведены ротационным и капиллярным методами. Проведено сравнение результатов и особенностей применения этих методов. Полученные результаты для всех наножидкостей не согласуются с теорией Бэтчелора. Для сравнения приведены также результаты, полученные другими авторами. Для наножидкости на основе оксида алюминия и смеси этиленгликоля и воды обнаружено, что с ростом объёмной концентрации наночастиц растёт отклонение от ньютоновского поведения.

Четвертая глава включает теоретическое исследование влияния теплового контактного сопротивления Капицы на тепловые свойства наножидкостей. Приведено решение следующих задач: вывод теории Максвелла о теплопроводности суспензий; теплопроводность наножидкостей с учетом температурного скачка Капицы на границе раздела; теплопроводность суспензий на основе core-shell частиц, и в частности полых частиц; теплообмен между сферической частицей и окружающей жидкостью с учетом теплового сопротивления Капицы при двух различных граничных условиях. Отмечено, что полученный в рассмотренных задачах безразмерный коэффициент может быть использован как критерий подобия для описания тепловых процессов в наножидкостях.

В **пятой главе** экспериментально исследована теплопроводность ряда наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия и на основе одностенных углеродных нанотрубок. Для наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия полученные значения теплопроводности преимущественно ниже значений предсказанных теорией. Для всех наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия приведена оценка величины контактного сопротивления Капицы. Проведено сравнение с результатами, полученными другими авторами. Также в данной главе представлены результаты измерений теплопроводности наножидкости на

основе одностенных углеродных нанотрубок и воды. Отмечено значительное возрастание теплопроводности с ростом объемной концентрации относительно теплопроводности базовой жидкости.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна

Проведено совместное экспериментальное исследование вязкости и теплопроводности наножидкостей, результаты которого позволили сделать вывод о том, что использование исследованных наножидкостей в качестве эффективного теплоносителя не является перспективным в связи с совместным ростом, как теплопроводности, так и вязкости теплоносителя.

Впервые предложен механизм для описания теплопроводности наножидкостей, связанный с уменьшением потоков тепла на границе частица–жидкость вследствие температурного скачка Капицы. Впервые аналитически решена задача о теплопроводности суспензий на основе сферических частиц в оболочке. Показано, что при стремлении толщины оболочки к нулю выражение для теплопроводности суспензии совпадает с выражением для теплопроводности суспензий, полученном с учетом температурного скачка Капицы на границе частица – жидкость.

Теоретический анализ, связанный с теплообменом между сферической частицей и жидкостью с учетом теплового сопротивления Капицы, показал, что для процессов теплообмена в наножидкостях можно выделить определяющий безразмерный параметр, включающий в себя размер частицы, теплопроводность базовой жидкости и величину контактного сопротивления между жидкостью и материалом частицы.

Достоверность полученных результатов подтверждена использованием апробированных методов экспериментальных измерений, постановкой калибровочных экспериментов, сравнением полученных результатов с работами других авторов, а также воспроизводимостью и набором статистики экспериментальных результатов.

Апробация работы проведена в достаточной мере, основные положения диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus и утверждённых ВАК. Также результаты диссертации неоднократно представлялись на всероссийских и международных научных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть учтены при выборе теплоносителей для эффективных охлаждающих систем. Полученные в работе результаты теоретического исследования и использование комплексного подхода к экспериментальным исследованиям могут применяться при исследовании теплофизических свойств других наножидкостей. Теоретические модели развитые в работе могут применяться в смежных областях. Например, использование наночастиц и наножидкостей для криогенных технологий хранения биологических материалов в наше время вновь вызывает интерес научного сообщества, поэтому теоретические модели и измерительные схемы для определения тепловых потоков в наночастицах могут быть крайне полезны для развития этого направления.

Замечания

Тем не менее, в работе не обошлось без опечаток, например, на рисунке 3.7 указана объемная концентрация 0,51% вместо 1,51%; в первой литературной ссылке стоит имя Chol, а в тексте упоминается как Choi.

Также общим замечанием можно отметить стилистические ошибки и спорный порядок изложения в ряде мест текста. Так, например, величины «фактор формы» и «сферичность» упоминаются в пункте 1.2 а точное их определение дано только в пункте 2.1. Индексы f и p для величин, относящихся к среде и частицам, определённые в пункте 4.2 используются, начиная с пункта 4.1. Также во введении говорится о теории Бэтчелора, тепловом сопротивлении Капицы, и ряде других терминов и эффектов, однако литературные ссылки на соответствующие работы даются только в разделе посвященном теории.

В нескольких местах вводятся параметры, которые можно понять, однако без конкретного их определения и сепарации от схожих величин, возникают трудности с восприятием материала работы. Так, например, введены характерный масштаб на стр. 20, скорость истекания в формуле 2.9 (в отличие от скорости из формулы 2.5), характерный размер несферических частиц на стр. 34.

В главе 4 и 5 используются текстовые повторения, которые с одной стороны подчеркивают совпадение подходов к моделированию и описанию результатов, однако побуждают читателя теряться в последовательности описанных случаев.

Полученные величины контактного сопротивления для разных частиц и наножидкостей приведены в разных пунктах по отдельности, что затрудняет их сравнение.

Для более детального обсуждения можно выделить следующие вопросы:

1. В работе говорится о стабильности используемых наножидкостей, однако не приводятся конкретные величины времен устойчивости и предельных устойчивых концентрациях. Определялось ли влияние интенсивности ультразвуковой обработки и температуры приготовления смеси на устойчивость наножидкости? Проводился ли контроль седиментации при проведении капиллярных измерений вязкости?

2. Погрешности при измерении теплопроводности не указаны на графиках как для данных по измерению вязкости, однако в тексте указано, что точность измерения для метода составляет 0,5%. Тем не менее, в тексте говорится о более «точном» измерении для этиленгликоля. О какой точности здесь идёт речь? Какова при этом точность определения объемной концентрации наночастиц?

3. В тексте говорится о том, что задача с тепловым сопротивлением Капицы уже решена для наножидкости. Правильно ли понимать, что оригинальным в работе является распространение решения на частицы типа ядро оболочка, и определение параметра контактного сопротивления по экспериментальным данным? Этот вопрос затрагивает конкретизацию второго итогового вывода.

4. С чем связано столь большое различие между величинами ротационной и капиллярной вязкости (приведённых на рис 3.8.) при одинаковых скоростях сдвига?

Приведённые замечания не снижают ценности диссертационной работы, являющейся законченной научно-квалификационной работой. Полученные в работе результаты достоверны, поставленные задачи решены, выводы обоснованы. Как экспериментальная, так и теоретическая часть исследования выполнена на высоком уровне. Результаты работы достаточно полно представлены в публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По содержанию, объёму и качеству проведённых исследований, научной новизне и практической значимости представленная работа "Теплопроводность и вязкость наножидкостей" соответствует всем требованиям п. 9 "Положения о присуждении учёных степеней", утверждёнными Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013г., а её автор Морозова Марина Анатольевна заслуживает присуждения

учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Младший научный сотрудник лаборатории Аэрофизических исследований дозвуковых течений Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, кандидат физико-математических наук, специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы



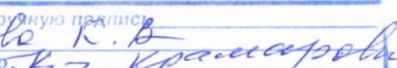
Зобов Константин Владимирович

"15" ноября 2019 г.

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, телефон: (383) 330-42-68, факс: (383) 330-72-68, эл. почта: zobov.kv@gmail.com

Я, Зобов Константин Владимирович, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Морозовой Марины Анатольевны, и их дальнейшую обработку.



Собственноручную подпись
Зобов К.В.
достоверяю 
Зав. канцелярией Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук