

На правах рукописи



Морозова Марина Анатольевна

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Новопашин Сергей Андреевич

Официальные оппоненты:

Дмитриев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Институт тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ), Кафедра низких температур, Лаборатория теплофизики наноструктур, заведующий лабораторией.

Зобов Константин Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория аэрофизических исследований дозвуковых течений, младший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится 11 декабря 2019 г. в 9:30 на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теплофизики СО РАН, www.itp.nsc.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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. Этого можно добиться, повысив теплопроводность жидкости путём добавления твёрдых частиц с высокой теплопроводностью. При этом наряду с теплопроводностью изменяются все теплофизические свойства жидкости. Важной характеристикой при использовании проточных систем охлаждения является вязкость. Особый интерес при создании таких систем представляют наножидкости. Для них характерно значительное изменение теплофизических свойств базовой жидкости даже при небольшой концентрации наночастиц. Также в отличие от частиц микронного размера, наночастицы медленнее осаждаются и не приводят к засорению и износу каналов.

Возможность использования наножидкостей при создании эффективных материалов для отвода избыточного тепла в охлаждающих системах является одной из основных причин проведения многочисленных исследований в лабораториях по всему миру. Использование наножидкостей в качестве рабочих элементов является перспективным методом создания новых теплоэнергетических установок, установок по транспортировке тепловой энергии, различных МЭМС-систем. В качестве диспергирующей среды в таких наножидкостях используют наиболее распространенные жидкие теплоносители – вода, спирты, машинные масла; в качестве твердых включений используются металлические частицы - медь, железо, серебро, золото и неметаллические - Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , Fe_3O_4 , углеродные нанотрубки, а также в настоящее время активно развиваются технологии на основе наночастиц из phase-change материалов (этот материал представляет собой вещество с высокой теплотой плавления, которое, плавясь и затвердевая при определенной температуре, способно хранить и высвобождать большие количества энергии). 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.

Несмотря на многочисленные исследования в течение последних двух десятилетий, многие полученные к настоящему времени экспериментальные данные для теплофизических свойств наножидкостей имеют большой разброс и зачастую противоречат друг другу. Это объясняется сложностью описания процессов, происходящих в наножидкостях. Например, в ходе эксперимента трудно сказать о степени однородности распределения частиц и количестве слипшихся или осевших частиц. Важно также учитывать реологию наножидкостей, так как большая концентрация частиц, несферическая форма или малый диаметр отдельно или в совокупности могут приводить к переходу от ньютоновского к неньютоновскому поведению жидкости.

Также трудности возникают при теоретическом описании теплофизических свойств наножидкостей. В исследованиях теплопроводности наножидкостей помимо классической теории Максвелла, были предложены теоретические модели, которые учитывают не только зависимость от объемной концентрации наночастиц, но множество других факторов: влияние Броуновского движения наночастиц, их форму, зависимость теплопроводности от температуры, поверхностного заряда и pH системы и др. Отметим, что до настоящего времени при анализе экспериментальных результатов по теплопроводности наножидкостей вклад теплового контактного сопротивления не учитывался. Для описания вязкости наножидкостей чаще всего используется теория Бэтчелора, основанная на классической теории вязкости суспензий, предложенной Эйнштейном, но с учётом явлений, возникающих в суспензиях на основе более мелких частиц. Несмотря на то, что наножидкости представляют собой двухфазную систему, изучение которых ведется не один десяток лет, на данный момент нет теории, приемлемо предсказывающей экспериментальные данные, и не описаны механизмы столь сильного изменения теплофизических свойств наножидкостей.

Целью настоящей работы является исследование вязкости и теплопроводности наножидкостей, в том числе исследование влияния теплового контактного сопротивления Капицы на процессы теплопереноса в наножидкостях.

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

1. Экспериментально исследовать теплопроводность и вязкость наножидкостей.

2. Провести теоретический анализ влияния контактного теплового сопротивления 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. Также 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 объемной концентрации наночастиц.
5. Результаты совместного исследования вязкости и теплопроводности показали, что применение исследованных в настоящей работе наножидкостей в качестве эффективного теплоносителя не является перспективным. Причина состоит в существенно более сильном возрастании вязкости наножидкостей по сравнению с их теплопроводностью при увеличении объемного содержания наночастиц.

Теоретическая и практическая значимость

Исследованные в настоящей работе наножидкости не могут быть использованы в качестве эффективных теплоносителей.

Решения тепловых задач и предложенный критерий подобия могут быть использованы для описания тепловых процессов в наножидкостях и интерпретации экспериментальных исследований других наножидкостей.

Результаты теоретического и экспериментального исследования влияния контактного теплового сопротивления Капицы на теплопроводность наножидкостей могут быть использованы для исследования других наножидкостей, имеющих перспективу использования в качестве эффективных теплоносителей.

Основные положения, выносимые на защиту

Результаты исследования теплопроводности, вязкости и реологических свойств наножидкостей.

Решения задач о теплопроводности наножидкостей на основе сферических частиц покрытых оболочкой и о теплообмене между сферической частицей и внешней средой с учетом теплового контактного сопротивления Капицы.

Обоснование нового критерия подобия, характеризующего вклад теплового контактного сопротивления Капицы при описании тепловых процессов в наножидкостях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных апробированных методов измерений, проведением калибровочных измерений, анализом погрешностей и воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов.

Личный вклад автора состоял в подготовке и проведении всех представленных в диссертации экспериментов, обработке, анализе и интерпретации результатов, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов для представления работы на конференциях. Теоретический анализ был проведен в составе научного коллектива с непосредственным участием автора.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 22–25 ноября 2016 г.; Russia-Japan Conference «Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures», Novosibirsk, Russia, October 30 – November 3, 2016; International Symposium and School for Young Scientists «Interfacial Phenomena And Heat Transfer», Novosibirsk, Russia, 2–4 of

March 2016; 17th International Conference «Materials, methods & technologies», Elenite Holiday Village, Bulgaria 7–11 June 2015; XIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» Новосибирск, 20–23 ноября 2014 г.; 18-ая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных, Красноярск, 29 марта – 05 апреля 2012 г.; XLIX Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 16–20 апреля 2011 г.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 7 научных статьях, опубликованных в журналах из списка ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 103 страниц с 43 рисунками. Список цитируемой литературы содержит 91 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и определены задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния исследований теплопроводности и вязкости наножидкостей.

В *разделе 1.1* приведена общая характеристика наножидкостей и методы их получения. Методы получения наножидкостей можно разделить на две группы - одностадийные и двухстадийные. Подробно рассмотрен двухстадийный метод получения наножидкостей, используемый в данной работе, и представляющий наибольший практический интерес. В рамках данного метода сначала различными способами получают наночастицы, а затем диспергируют их в несущей жидкости при помощи ультразвука или магнитного поля. Рассмотрены также способы достижения устойчивости наножидкостей. Значительное влияние на устойчивость наножидкостей оказывает двойной электрический слой, возникающий при контакте двух фаз на границе раздела твёрдой частицы и жидкости. Одной из важнейших характеристик двойного электрического слоя является дзета-потенциал, характеризующий силу отталкивания электрических слоев частиц. Изменение дзета-потенциала лежит в основе ряда методов стабилизации наножидкостей. Кроме того, двойной электрический слой может увеличивать вязкость наножидкостей. Данный эффект называют электровязкостным. Также существует метод, позволяющий получать высокодисперсные, однородные и химически чистые суспензии - метод ультразвукового диспергирования. В процессе приготовления наножидкости обрабатываются ультразвуковыми волнами, и при воздействии ультразвука на агрегаты твердых частиц, связанных между собой силами слипания, спекания или спайности происходит их диспергирование. Для предотвращения коагуляции твердых частиц в конце процесса диспергирования чаще всего в жидкость вводят поверхностно-активное вещество (ПАВ). ПАВ адсорбируется на межфазной поверхности, что определяет его стабилизирующее действие. Так как адсорбционные слои лиофилизуют поверхность, то при сближении частиц на достаточно малые расстояния, при которых существенную роль начинают играть силы межмолекулярного притяжения, развиваются силы отталкивания. При этом чем выше концентрация адсорбтива в межфазном слое, тем больше энергия отталкивания. Стоит отметить, что добавление ПАВ в наножидкость может значительно повлиять на её вязкость, поэтому в данной работе ПАВ не использовались.

В *разделе 1.2* приведены основные теоретические подходы, используемые для описания теплопроводности суспензий. Для описания теплопроводности наножидкостей в настоящее время предложено множество моделей, однако вопрос точного описания механизма теплопроводности до сих пор не решён. Для описания тепловых свойств суспензий на основе более крупных частиц применяют классическую теорию Максвелла. Данная теория была предложена для суспензий на основе неподвижных сферических микро- и макрочастиц малой концентрации. Гамильтон и Кроссер обобщили данную модель для несферических частиц. Модель Гамильтона-Кроссера является наиболее распространенной для сравнения с экспериментальными данными, полученными для теплопроводности наножидкостей. Однако, существует ряд дополнительных факторов, влияющих на теплопроводность наножидкостей, и на основе которых предложено множество моделей теплопроводности: броуновское движение наночастиц, агрегация наночастиц, баллистический теплоперенос, возникновение структур из наночастиц (перколяционных цепей, сетевых структур), фононный механизм, отвечающий уравнению Больцмана и наличие упорядоченного слоя жидкости на поверхности наночастицы. Также существенное влияние на теплопроводность наножидкостей может оказать граница раздела жидкость-частица и др. Так для ряда наножидкостей существенный отрицательный вклад в теплопроводность может внести контактное тепловое сопротивление Капицы. Это явление было обнаружено в экспериментах Капицы по теплопроводности сверхтекучего гелия и заключается в том, что на границе раздела двух сред при наличии потока тепла через неё возникает скачок температуры. В связи с относительно малой величиной данного сопротивления его вклад сказывается для систем малого размера или обладающих высокой теплопроводностью. До недавнего времени считалось, что скачок температуры Капицы можно не учитывать при комнатных температурах. Однако развитие нанотехнологий инициировало изучение этого явления в широком диапазоне температур и для различных пар твердых материалов. Оценки величины теплового сопротивления Капицы на границе раздела жидкость-твёрдое тело показывают, что

температурный скачок Капицы может оказывать влияние на протекание тепловых процессов в наножидкостях.

В *разделе 1.3* проведен обзор экспериментальных данных, описывающих теплопроводность наножидкостей. К настоящему моменту времени проведено большое количество экспериментальных исследований, посвященных теплопроводности наножидкостей, однако многие полученные данные не только значительно разнятся у разных авторов, но и не согласуются с предложенными для их описания теориями. Опубликовано много результатов, свидетельствующих о значительном увеличении теплопроводности наножидкостей как в сравнении с базовой жидкостью, так и с макроскопическими теориями Максвелла и Гамильтона-Кроссера. Однако также существуют данные исследований, проведенных разными методами с идентичными образцами различных наножидкостей в 34 организациях по всему миру. Были сделаны выводы, что результаты хорошо согласуются с классической теорией Максвелла, наблюдаемые отклонения от теоретических значений не превышали погрешностей измерений. Также согласно исследованиям группы ученых из Массачусетского Технологического Института, эффекта аномального изменения теплопроводности обнаружено не было.

Такие существенные отличия в экспериментальных данных можно объяснить многими причинами. Во время проведения экспериментов сложно достаточно хорошо описать исследуемую взвесь. Например, невозможно сказать о количестве частиц, выпавших в осадок, или о количестве слипшихся частиц. Это является существенным недостатком экспериментов. Также существует много причин, которые могут оказать влияние на теплофизические свойства наножидкостей: свойства исходных наночастиц, метод диспергирования, использование различных ПАВ и др. Кроме того, при проведении экспериментов следует учитывать и другие свойства наножидкостей, такие как сильная зависимость теплопроводности от температуры и увеличенное значение критического теплового потока.

В *разделе 1.4* представлены теоретические подходы, используемые для описания вязкости суспензий. Так как при использовании в качестве охлаждающих жидкостей наножидкости движутся по каналам, то важными для изучения свойством является их вязкость. На данный момент не предложено теории, точно описывающей вязкость наножидкостей. Зависимость вязкости суспензий, содержащих сферические частицы, от объемной концентрации этих частиц впервые сформулировал Эйнштейн. Затем Бэтчелор обобщил формулу Эйнштейна для более высоких концентраций частиц и для более мелких частиц. Он учёл гидродинамическое взаимодействие между частицами и влияние броуновского движения, которому подвержены наночастицы. Позднее различными авторами был предложен ряд теорий, как дополняющих теорию Эйнштейна, так и полученных другими методами. Но сравнение экспериментальных данных для наножидкостей ставит под сомнение возможность применения данных теорий для описания их вязкости. Также был описан механизм возрастания вязкости, связанный с влиянием двойного электрического слоя на границе частица-жидкость. Присоединенный слой базовой жидкости может значительно увеличивать эффективный объем наночастицы и таким образом оказывать влияние на вязкость. Однако вопрос получения точного выражения, описывающего вязкость наножидкостей, остаётся актуальным.

Раздел 1.5 посвящен обзору экспериментальных данных, описывающих вязкость наножидкостей. Экспериментальных данных по исследованию вязкости наножидкостей опубликовано немного в сравнении с количеством данных по исследованию других теплофизических свойств, в частности данных по изучению теплопроводности. Экспериментальные данные также имеют большой разброс, и стоит отметить, что он не только количественный, но и качественный. Все экспериментальные значения, описывающие зависимость вязкости наножидкости от объёмной концентрации наночастиц, лежат выше теоретических зависимостей Эйнштейна и Бэтчелора. Были изучены также зависимости вязкости от других параметров: температуры, размера и материала частиц. Отмечена была и зависимость вязкости наножидкостей от выбора базовой жидкости и материала наночастиц.

В *заключении* отмечено, что для проведения исследований теплопроводности и вязкости наножидкостей оптимальным является двухстадийный метод приготовления без использования поверхностно-активных веществ. На основании проведенного обзора сделан вывод о том, что к настоящему моменту времени механизм теплопроводности и вязкости в наножидкостях полностью не изучен, а разброс экспериментальных данных составляет сотни процентов. Данные выводы определили цель диссертационной работы и задачи исследования.

Во **второй главе** описаны исходные материалы, экспериментальные установки и методы исследования теплопроводности и вязкости наножидкостей.

В *разделе 2.1* представлены характеристики наночастиц, на основе которых были получены наножидкости, и описаны способы их синтеза. Выбор наночастиц прежде всего был обусловлен возможностью получить устойчивые наножидкости на их основе. В работе использовались наночастицы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ производства фирмы Degussa (Германия). Анализ на основе фотографий, полученных при помощи просвечивающего электронного микроскопа, показал, что большинство частиц не является сферическими, а имеют вытянутую форму. Согласно данным производителя удельная площадь поверхности для данных частиц составляет $100 \text{ м}^2/\text{г}$. При пересчёте на сферическую форму средний диаметр частиц составляет 13 нм. Поверхность данных наночастиц лиофильна по отношению к использованным в данной работе базовым жидкостям, что позволило создавать устойчивые наножидкости на их основе без применения дополнительных стабилизаторов.

Наночастицы Al_2O_3 , использованные в данной работе, синтезированы в Институте теплофизики СО РАН. Анализ на основе фотографий, полученных при помощи просвечивающего электронного микроскопа, показал, что материал представляет собой полые наночастицы, имеющие форму, близкую к сферической, с характерным диаметром 10 нм. Важным параметром для анализа результатов исследований наножидкостей на основе таких частиц является величина a/b , где b – внешний радиус наночастиц, a – радиус полости наночастиц. Для данных наночастиц среднее значение a/b составляет 0,54. Также отметим, что поверхность данных наночастиц лиофильна по отношению к использованным в данной работе базовым жидкостям.

В работе также использовались очищенные химически модифицированные одностенные углеродные нанотрубки, полученные в ИНХ СО РАН. Анализ спектров комбинационного рассеяния и фотографий, полученных при помощи электронного микроскопа, показал, что после очистки материала содержание одностенных углеродных нанотрубок в исходном материале составило $\sim 95 \%$. Анализ исходного материала, проведённый в процессе исследования теплопроводности наножидкости на его основе, позволил зарегистрировать деградацию одностенных углеродных нанотрубок со временем.

В *разделе 2.2* описан процесс синтеза наножидкостей. Все наножидкости были получены двухстадийным методом. В процессе приготовления наножидкости были обработаны ультразвуком. После обработки наножидкости помещались в водяной термостат при температуре 25°C для дальнейшего измерения теплопроводности и вязкости.

Раздел 2.3 посвящен методам исследования вязкости и описанию оборудования, использованного в экспериментах. Применение двух разных методов исследования вязкости позволило сопоставить полученные результаты в широком диапазоне скоростей сдвига. Также в данном разделе приведены результаты калибровочных измерений.

Первый метод исследования вязкости – капиллярный. В основе метода лежит принцип ламинарного течения Хагена-Пуазейля. Схема установки для измерения вязкости данным методом показана на рисунке 1.

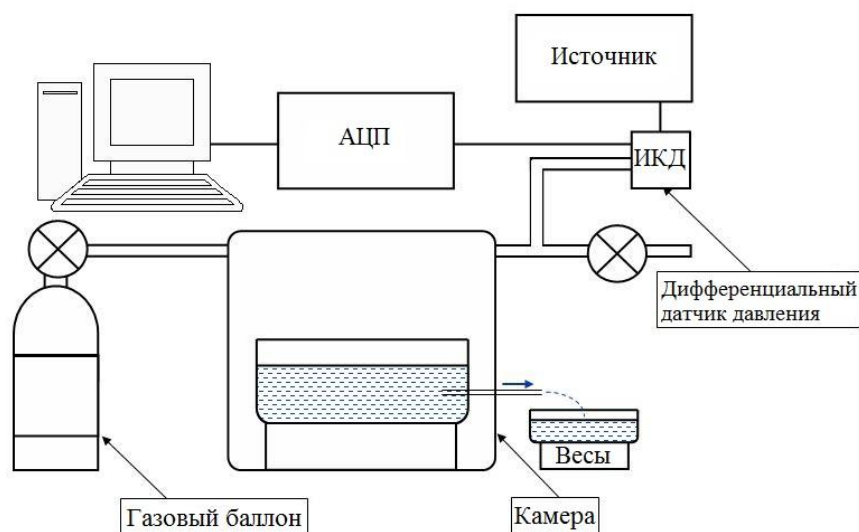


Рис. 1 Схема установки для измерения вязкости наножидкостей.

Для проведения эксперимента кювета с исследуемой жидкостью помещается в камеру, к которой присоединён баллон с газом. При помощи баллона с газом, соединенного с камерой создается избыточное давление, и жидкость вытекает из кюветы через закрепленный в её стенке капилляр, проходящий также через стенку камеры. Разницу давлений регистрирует дифференциальный датчик давления ИКД-0.25, соединенный с источником питания. Данные с приборов, проходя через АЦП, отображаются на компьютере. При помощи секундомера отсчитывались одинаковые промежутки времени. Жидкость вытекала в кювету, а затем взвешивалась. Температура во всех экспериментах была измерена термометром. Таким образом, параметров установки и полученных экспериментальных данных достаточно, чтобы рассчитать объемный расход жидкости, вытекающей через капилляр, и вычислить коэффициенты вязкости согласно закону Пуазейля. Также можно рассчитать коэффициенты пропорциональности λ и числа Рейнольдса.

Первым шагом в измерениях была выполнена калибровка дифференциального датчика давления ИКД-0.25. Вторым шагом был проведён эксперимент с дистиллированной водой. Данный эксперимент позволил определить эффективный диаметр капилляра, используемого в экспериментах. Согласование экспериментальных данных с рассчитанными по табличным значениям достигается при значении диаметра 1,2 мм. Это значение использовалось при расчетах в последующих экспериментах.

В эксперименте для каждой разницы давлений между камерой и атмосферой ΔP была измерена масса жидкости, вытекающей за одинаковые промежутки времени. При расчёте ΔP учитывалась поправка для столба жидкости, находящейся над уровнем капилляра в кювете.

Параметры эксперимента: длина капилляра $L = 300$ мм, его эффективный диаметр $d = 1,2$ мм, числа Рейнольдса $Re = 3-12$, время $t = 60$ с, температура $T = 25$ °С. При таких числах Рейнольдса течение в капилляре ламинарное, а отношение $L/d = 250$ показывает, что в капилляре формируется пуазейлевский профиль скоростей.

Погрешность измерений капиллярным методом определялась случайным разбросом измеряемых величин. Для уменьшения погрешности проводилась серия из 10 - 15 измерений, для которой вычислялась средняя величина и дисперсия значений. Результаты измерений представлены как среднее значение с диапазоном доверительного интервала, соответствующим достоверности 67%.

Второй метод исследования вязкости - ротационный. Для сравнения с полученными капиллярным методом данными были проведены измерения при помощи ротационных вискозиметров Brookfield DV-II+ Pro и Fungilab Expert L. Погрешность измерения вязкости ротационным вискозиметром зависела от скорости сдвига и определялась программой вискозиметра. Для достоверности каждая точка была измерена несколько раз.

Раздел 2.4 посвящен описанию прибора для исследования теплопроводности. Также в данном разделе приведены результаты калибровочных измерений. Измерения теплопроводности наножидкостей проводились при помощи Мобильного прибора для экспрессного сопоставления теплового сопротивления наножидкостей. Прибор предназначен для сопоставления обобщенных характеристик теплообмена в импульсно нагретых жидкостях, близких по своим свойствам при нормальных условиях. Опыты проводятся относительным методом. Нагревателем и датчиком полезного сигнала служит зонд – платиновая проволочка для термометра сопротивления диаметром 20 мкм и длиной 3 мм, закрепленная между двумя электрическими выводами.

Схема устройства осуществляет нагрев зонда в два последовательных этапа с различной мощностью (рис. 2).

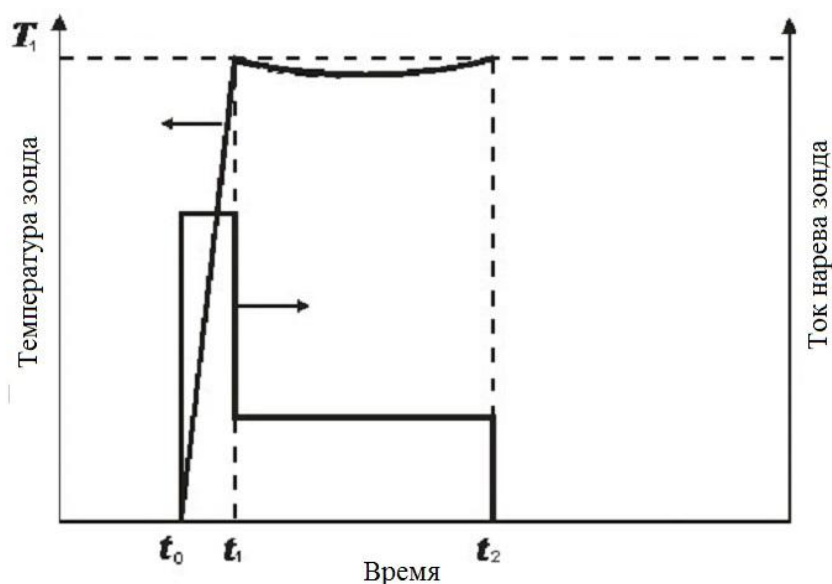


Рис. 2 Схема опыта. Длительность участков нагрева $t_0 \rightarrow t_1$ и измерения $\Delta t = t_2 - t_1$ составляет 10^{-4} с и 10^{-3} с по порядку величины, соответственно.

На первом этапе измерений осуществляется перевод жидкости в выбранную область температуры. За отрезок времени $t_0 \rightarrow t_1$ температура зонда, а, следовательно, и температура пристеночного слоя жидкости, возрастают от исходного значения T_0 до заданного значения температуры T_1 . На втором этапе измерения происходит остывание и повторный нагрев до значения T_1 с отклонением температуры зонда $T(t_1 \rightarrow t_2)$ от значения T_1 на единицы градусов. Длина отрезка $\Delta t = t_2 - t_1$ при заданной функции нагрева выбрана в качестве измеряемого параметра. Она определяется значением теплового сопротивления образца. Образцу с большим тепловым сопротивлением отвечает меньшее значение теплового потока и, следовательно, меньшее значение Δt . Значение Δt чувствительно к содержанию примесей в базовой жидкости, их типу и термодинамическому средству. Прием и обработка данных проводится с помощью специально написанной программы, позволяющей сохранять результаты измерений в виде графиков несущих информацию о тепловом сопротивлении образцов. Измеряемым в опыте эквивалентом значений температуры зонда являются значения напряжения.

Для получения абсолютных значений коэффициентов теплопроводности проводилась калибровка зонда. Эксперимент был проведен с жидкостями с известным коэффициентом теплопроводности: водой, смесями воды и этанола, этиленгликолем, изопропанолом, которые находились в термостате при температуре 25°C , затем была построена калибровочные кривые. В дальнейшем при подстановке полученных с прибора данных для наножидкостей в уравнения аппроксимации для калибровочных кривых были рассчитаны значения реальной теплопроводности исследуемых образцов.

Погрешность измерений определялась случайным разбросом измеряемых величин. Для уменьшения погрешности проводилась серия из 20 - 40 измерений, для которой вычислялась средняя величина и дисперсия значений. Результат измерений представлялся как среднее значение с диапазоном доверительного интервала, соответствующим достоверности 67%. Для всех проведенных экспериментов погрешность не превышала 0,5%.

В разделе 2.5 обобщены результаты подготовки к экспериментальному исследованию теплопроводности и вязкости наножидкостей.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования вязкости наножидкостей.

В разделе 3.1 представлены результаты экспериментального исследования вязкости наножидкости на основе наночастиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Degussa) и смеси 90% этиленгликоля и 10% воды в качестве базовой жидкости. Измерения проведены для наножидкостей с объемным содержанием наночастиц до 1,51%. Результаты сопоставления измерений капиллярным методом и ротационным вискозиметром с теорией Бэтчелора приведены на рисунке 3. Дополнительно на рисунке 3 представлены результаты для вязкости наножидкости на основе этиленгликоля и наночастиц оксида алюминия большего диаметра, полученные другими авторами.

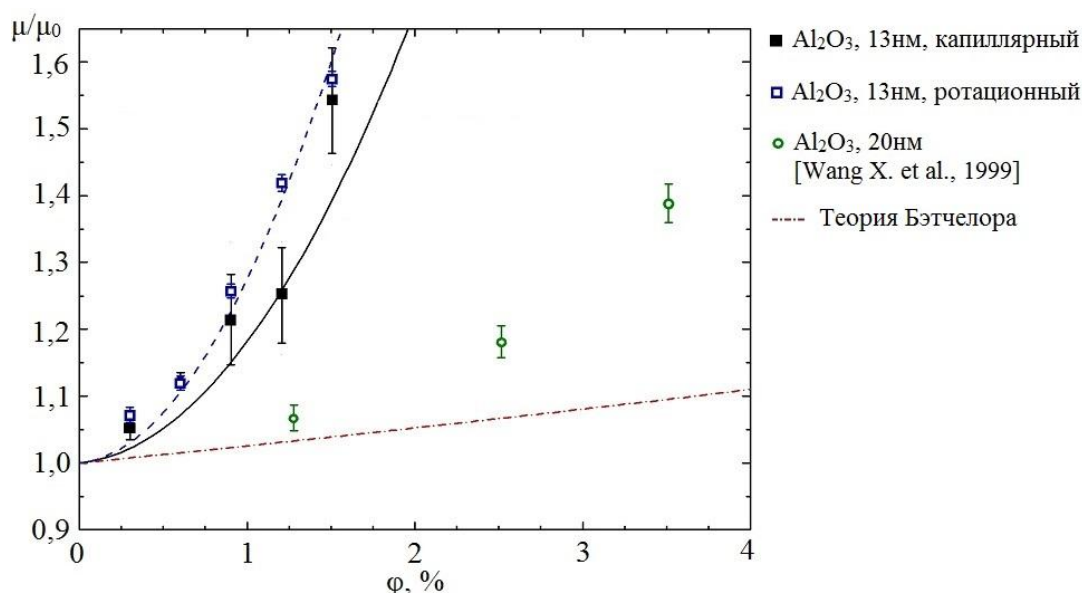


Рис. 3 Зависимость вязкости наножидкостей на основе этиленгликоля и наночастиц Al_2O_3 от объёмной концентрации наночастиц ϕ .

Как показывает рисунок 3, полученные в настоящей работе и полученные ранее другими авторами экспериментальные данные не согласуются с теорией Бэтчелора, не смотря на то, что в ней учтены гидродинамическое взаимодействие между частицами и их броуновское движение. Это свидетельствует о том, что для описания вязкости наножидкостей зависит не только от объёмной концентрации частиц, но и от других параметров.

Отметим два исследования, которые могут объяснить отличие экспериментальных данных от предсказаний теории Бэтчелора. Во-первых, в работе (Wang X., Xu X., S. Choi S. U. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture //Journal of thermophysics and heat transfer. – 1999. – Т. 13. – №. 4. – С. 474-480.) описан механизм возрастания вязкости, возникающего из-за увеличения эффективного объема наночастицы за счёт присоединенного слоя базовой жидкости, связанного с влиянием двойного электрического слоя на границе частица-жидкость. Во-вторых, результаты математического моделирования методом молекулярной динамики, полученные в работе (Рудяк В. Я., Белкин А. А., Егоров В. В. Об эффективной вязкости наносuspensions //Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – №. 8. – С. 18-25.), также показали, что с ростом объёмной концентрации наночастиц вязкость наножидкостей с меньшим диаметром частиц оказывается существенно выше, чем у наножидкостей с более крупными частицами.

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментального исследования реологических свойств наножидкости на основе наночастиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и смеси 90% этиленгликоля и 10% воды в качестве базовой жидкости. Эксперименты по измерению вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+ Pro проведены при скоростях сдвига от 25 до 250 с^{-1} . При построении зависимостей вязкости от скоростей сдвига было обнаружено, что среднее значение вязкости имеет тенденцию к увеличению при малых скоростях сдвига, особенно для наножидкости. Однако погрешность измерений также возрастала с уменьшением скорости сдвига.

Для определения реологических свойств исследуемой наножидкости были проведены дополнительные измерения капиллярным методом. Полученная зависимость коэффициента сопротивления от чисел Рейнольдса в диапазоне, соответствующем текущим экспериментам, отличалась от теоретической зависимости не более чем на 2%. Отличие же при больших числах Рейнольдса было связано увеличением вклада начального участка течения, в котором происходит формирование паузейлевского профиля скорости.

Были также построены зависимости скорости потока от перепада давления при различных концентрациях наночастиц в наножидкости (рис. 4). Ньютонское поведение жидкостей определяют линейные зависимости. В текущих экспериментах линейная зависимость наблюдалась только для базовой жидкости. Линейные функции, проведённые от нуля до последних экспериментальных точек, соответствующих наибольшему перепаду давления, показали, что экспериментальные данные для наножидкостей расположены ниже. Причём, отклонение от линейной зависимости возрастает с увеличением объёмной концентрации наночастиц, что свидетельствует о неньютоновском поведении исследуемых наножидкостей.

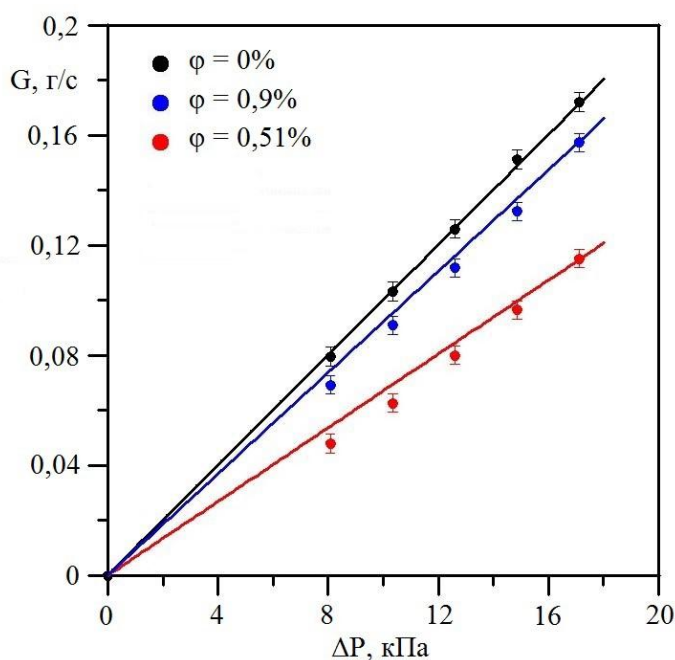


Рис. 4 Зависимость скорости потока G от перепада давлений ΔP .

Зависимость вязкости наножидкостей, измеренной двумя методами, от скоростей сдвига представлена на рисунке 5. В измерениях капиллярным методом вязкость была рассчитана по закону Хагена - Пуазейля. Величина скорости сдвига была рассчитана по расходной скорости и радиусу трубы. Чтобы количественно охарактеризовать влияние реологических свойств на вязкость, были использованы средние значения вязкости для каждой объемной концентрации наночастиц.

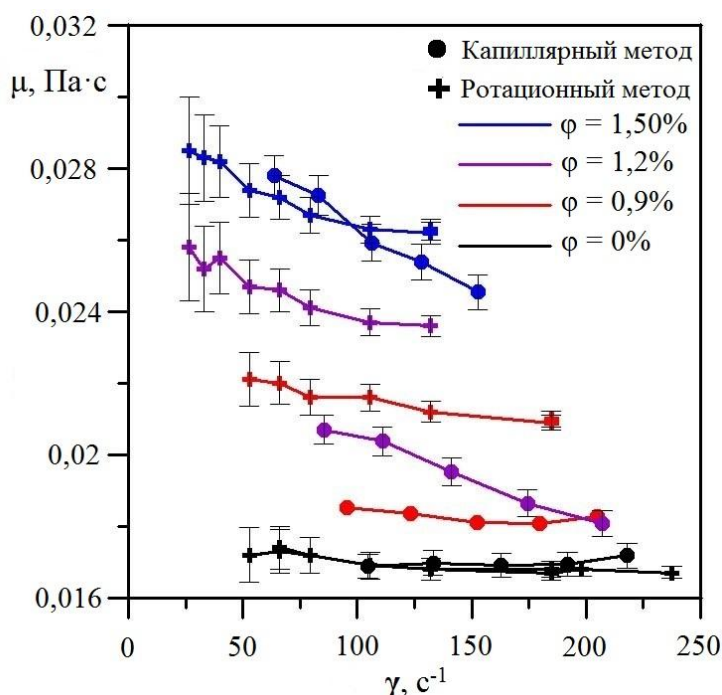


Рис. 5 Зависимость вязкости наножидкостей μ от скорости сдвига γ .

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментального исследования вязкости наножидкости на основе полых наночастиц γ - Al_2O_3 с внешним радиусом 5 нм и радиусом полости около 2,5 нм и воды. Измерения проведены для наножидкостей с объемным содержанием наночастиц до 3% на ротационном вискозиметре Fungilab Expert L. На рисунке 6 для сравнения приведены экспериментальные данные, полученные в данной работе, и данные, полученные ранее другими авторами для наножидкостей на основе воды и наночастиц оксида алюминия со средним диаметром частиц 28 нм, а также приведена зависимость, соответствующая теории Бэтчелора.

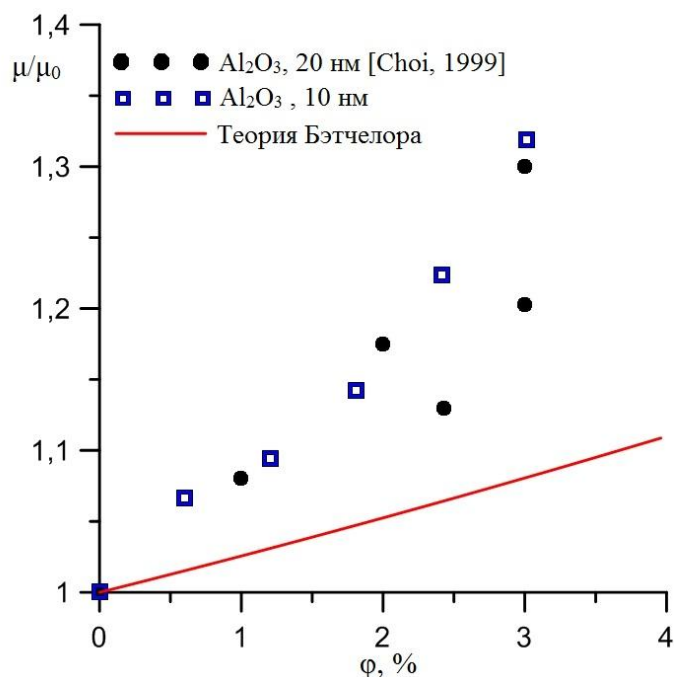


Рис. 6. Зависимость вязкости наножидкостей на основе воды от объёмной концентрации наночастиц ϕ .

Несмотря на то, что теория Бэтчелора учитывает броуновское движение частиц и их гидродинамическое взаимодействие, полученные разными методами экспериментальные данные с теорией не согласуются. Однако, эти данные достаточно хорошо согласуются между собой. Вязкость частиц с меньшим диаметром в целом выше вязкости более крупных частиц. Это свидетельствует о том, что помимо объёмной концентрации частиц при расчёте вязкости необходимо учитывать их диаметр.

В *разделе 3.4* обобщены результаты экспериментального исследования вязкости наножидкостей.

В *четвертой главе* проведен теоретический анализ влияния контактного теплового сопротивления Капицы на тепловые свойства наножидкостей. При рассмотрении теплопроводности наножидкостей использован подход Максвелла.

В *разделе 4.1.1.* повторен вывод Максвелла о теплопроводности суспензий при использовании равенства температур на границе частица–жидкость. Теория Максвелла основана на следующих предположениях: частицы имеют сферическую форму, концентрация частиц мала, частицы неподвижны, справедливо макроскопическое уравнение теплопроводности.

В *разделе 4.1.2* решена задача о теплопроводности наножидкостей с учетом температурного скачка Капицы на границе раздела: температурный скачок пропорционален потоку тепла через границу. Данная задача уже была решена ранее для композиционных материалов, поэтому задачу о влиянии теплового сопротивления Капицы на теплопроводность наножидкостей к настоящему времени можно считать решенной. Для решения задачи о теплопроводности суспензии на основе базовой жидкости теплопроводности κ_f и сферических частиц радиуса a , случайно расположенных в жидкости, имеющих теплопроводность κ_p , использовано решение задачи о стационарном распределении температур для одного шара при линейном распределении температур на бесконечности. При наличии теплового сопротивления Капицы на границе раздела ($r = a$) возникнет скачок температуры пропорциональный тепловому потоку через границу и величине контактного теплового сопротивления G . Второе условие равенства потоков тепла через границу не изменяется. В результате получаем решение, где введен безразмерный параметр $\gamma = \kappa_f G / a$, характеризующий роль поверхностного теплового сопротивления Капицы в теплопроводности наножидкостей на основе сферических наночастиц радиуса a , находящихся в жидкости с коэффициентом теплопроводности κ_f .

Получено выражение для искомой теплопроводности суспензии с учетом теплового сопротивления Капицы:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{[\kappa_p(1+2\gamma) + 2\kappa_f] - 2\phi[\kappa_f + \kappa_p(\gamma-1)]}{[\kappa_p(1+2\gamma) + 2\kappa_f] + \phi[\kappa_f + \kappa_p(\gamma-1)]}. \quad (1)$$

Рассмотрены предельные случаи:

1. $G = 0$, температурный скачок Капицы отсутствует и формула (1) переходит в формулу Максвелла при условии, что $\kappa_p \gg \kappa_f$.

2. Для практически важного случая $\kappa_p \gg \kappa_f$ и $\varphi \ll 1$ получена формула:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{(1 + 2\kappa_f G/a) - 2\varphi(\kappa_f G/a - 1)}{(1 + 2\kappa_f G/a) + \varphi(\kappa_f G/a - 1)} = \frac{(1 + 2\gamma) - 2\varphi(\gamma - 1)}{(1 + 2\gamma) + \varphi(\gamma - 1)} \approx 1 - 3\varphi \frac{(\gamma - 1)}{(2\gamma + 1)}. \quad (2)$$

3. Скачок Капицы велик, $\gamma = \kappa_f G/a \gg 1$, $\varphi \ll 1$, тогда формула (1) совпадает с формулой Максвелла для случая $\kappa_p \ll \kappa_f$, $\varphi \ll 1$.

Проведена количественная оценка влияния поверхностного теплового сопротивления Капицы на теплопроводность наножидкости для практически важного случая наночастиц оксида алюминия диаметром 10 нм в воде. Условия соответствовали приближению $\kappa_p \gg \kappa_f$. Данные оценки показали, что полученные значения могут быть проверены экспериментально.

Раздел 4.1.3 посвящен решению задачи о теплопроводности суспензий на основе сферических частиц в оболочке (core-shell частиц). Рассмотрена задача о теплопроводности суспензии на основе базовой жидкости теплопроводности κ_f и сферических частиц радиуса a , окруженных оболочкой с внешним радиусом b . Теплопроводность центрального ядра обозначена κ_p , а теплопроводность оболочки κ_s . Как и в предыдущем случае сначала решена задача об одиночной частице в бесконечной среде. При линейном распределении температур на бесконечности с граничными условиями равенства температур и непрерывности потока тепла через границы раздела получено выражение для теплопроводности суспензии на основе сферических частиц в оболочке:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{1 - 2\varphi \frac{C_f}{b^3}}{1 + \varphi \frac{C_f}{b^3}}, \quad \frac{C_f}{b^3} = \frac{(1 - \beta)(\alpha + 2\beta) + \frac{a^3}{b^3}(\beta - \alpha)(1 + 2\beta)}{(\alpha + 2\beta)(2 + \beta) + 2\frac{a^3}{b^3}(\beta - \alpha)(1 - \beta)}, \quad (3)$$

где $\alpha = \kappa_p / \kappa_f$ и $\beta = \kappa_s / \kappa_f$.

Для полученного решения рассмотрен ряд предельных случаев: полая оболочка, теплопроводность частиц равна теплопроводности жидкости, частицы без оболочки, теплопроводность ядра в 10 раз превышает теплопроводность жидкости; теплопроводность ядра в 100 раз превышает теплопроводность жидкости. Проведён анализ влияния на теплопроводность толщины оболочки частицы. Показано, что при малой теплопроводности оболочки ее влияние начинает падать с уменьшением толщины оболочки. Именно этот случай частиц, покрытых тонкими оболочками $\delta = b - a \ll a$, представляет особый интерес. При заданном (конечном) отношении коэффициентов теплопроводности частицы и жидкости ($\alpha \geq 1$), параметр β может меняться в очень широких пределах от $\beta \ll 1$ (покрытие - например, полиэтилен), до $\beta \gg 1$ (покрытие - золото). Рассмотрены эти два предельных случая. Если теплопроводность оболочки также падает, то результат будет зависеть от предела $G = \lim_{\delta \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0} (\delta / \kappa_s)$, где $\delta = b - a$.

Введён безразмерный параметр $\gamma = \kappa_f G/a = \delta / a\beta$. Переходя к теплопроводности суспензии в соответствии с формулой (3) получено:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{2(1 + \gamma\alpha) + \alpha - 2\varphi((1 + \gamma\alpha) - \alpha)}{2(1 + \gamma\alpha) + \alpha + \varphi((1 + \gamma\alpha) - \alpha)}. \quad (4)$$

Величина G имеет размерность теплового сопротивления. Полученная формула совпадает с данными работ по учету теплового сопротивления Капицы в композиционных материалах со сферическими частицами. Поэтому сделан вывод о том, что наряду с реальным контактным сопротивлением Капицы на границе частицы наличие тонкой оболочки с малой теплопроводностью (двойного электрического слоя, оксидной пленки и др.) также приводит к дополнительному тепловому сопротивлению на границе жидкость – частица.

Раздел 4.1.4 посвящен решению задачи о теплопроводности суспензий на основе полых частиц. Полые частицы являются частным случаем частиц в оболочке, рассмотренных в предыдущем разделе. Так как в данной работе экспериментально исследовались наножидкости на основе полых наночастиц оксида алюминия, то для этого случая решение записано отдельно. Для полых частиц $\alpha = \kappa_p / \kappa_f = 0$, и решение выглядит следующим образом:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{1 - 2\varphi \frac{(1 - \beta) + \frac{a^3}{2b^3}(1 + 2\beta)}{(2 + \beta) + \frac{a^3}{b^3}(1 - \beta)}}{1 + \varphi \frac{(1 - \beta) + \frac{a^3}{2b^3}(1 + 2\beta)}{(2 + \beta) + \frac{a^3}{b^3}(1 - \beta)}}. \quad (5)$$

В разделе 4.2 рассмотрены задачи о теплообмене между сферической частицей и окружающей жидкостью с учетом теплового сопротивления Капицы при двух различных граничных условиях. Во-первых, температура частицы и температура жидкости на бесконечности постоянны. Этот случай соответствует тепловой задаче с использованием теплоты фазового перехода в материале частицы. Во втором случае в частице происходит постоянное выделение энергии, а температура жидкости на бесконечности постоянна. Этот случай соответствует нагреву магнитных частиц в переменном магнитном поле, что используется в ряде медицинских приложений.

Оценки характерных времен установления теплового равновесия показали, что для макроскопических процессов, связанных с процессом теплопереноса, эти времена малы, что позволило для оценки влияния теплового сопротивления Капицы на процесс теплообмена между частицей и окружающей средой использовать стационарное уравнение теплопроводности. Решено стационарное неоднородное уравнение теплопроводности с источником тепла $q = \text{const}$ внутри шара радиуса a находящегося в бесконечной жидкости с учетом температурного скачка Капицы на границе шара. Граничные условия на границе $r = a$:

$$T_p(a) - T_f(a) = GQ = -G \frac{\partial T_p}{\partial r} \kappa_p = -G \frac{\partial T_f}{\partial r} \kappa_f, T_f(\infty) = T_\infty, \quad (6)$$

где G – величина теплового сопротивления Капицы, $Q = aq/3$ – поток тепла через единицу площади поверхности шара, T_∞ – температура на бесконечности, индексы f и p относятся соответственно к жидкости и частице.

С учетом граничных условий решение легко получается аналитически:

$$T_p(r) - T_\infty = \frac{1}{6} \frac{q}{\kappa_p} (a^2 - r^2) + \frac{a^2 q}{3\kappa_f} \left(1 + \frac{G\kappa_f}{a}\right), r < a;$$

$$T_f(r) - T_\infty = \frac{1}{r} \frac{a^3 q}{3\kappa_f}, r > a. \quad (7)$$

Для случая с заданной температурой шара и температурой на бесконечности получено решение:

$$T_f(r) - T_\infty = \frac{a}{r} \frac{(T_p - T_\infty)}{\left(\frac{G\kappa_f}{a} + 1\right)}. \quad (8)$$

Далее показано влияние параметра γ на температуру частицы при заданном потоке тепла и на поток тепла при заданном перепаде между температурой частицы и температурой на бесконечности и показано, что температурный скачок Капицы начинает оказывать существенное влияние на тепловые процессы в наножидкостях при значениях $\gamma > 1$.

Отметим, что на практике при интенсификации теплообмена за счёт теплоты фазового перехода и при гипертермии используются рассмотренные ранее частицы покрытые оболочкой. В этом случае частицы имеют две контактные поверхности и, соответственно, два температурных скачка Капицы, а конечная величина оболочки вносит дополнительный вклад в тепловое сопротивление. Таким образом, вклад теплового сопротивления при решении подобных задач может оказаться существенным.

Полученный в настоящей главе для описания теплообмена между сферической частицей и жидкостью параметр $\gamma = \kappa_f G/a$ совпадает с параметром, полученным в разделе 4.1.2 и характеризующим изменение теплопроводности суспензий с учётом теплового сопротивления Капицы. Общий характер этого безразмерного параметра позволяет отнести его к параметрам подобия при описании тепловых процессов в наножидкостях при учете температурного скачка Капицы.

В разделе 4.3 представлены основные результаты теоретического анализа.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования теплопроводности наножидкостей.

В разделе 5.1 представлены результаты экспериментального исследования теплопроводности наножидкости на основе наночастиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Degussa) и смеси 90% этиленгликоля и 10% воды в качестве базовой жидкости. Измерения проведены для наножидкости с объемным содержанием наночастиц до 1,40%. Так как метод измерений относительный, в качестве эталона была взята базовая жидкость – смесь 90% этиленгликоля и 10% воды. Результаты измерений и теоретическая зависимость показаны на рисунке 5. Полученные экспериментальные данные не согласуются с теорией и лежат преимущественно ниже теоретической прямой, что свидетельствует о том, что теплопроводность наножидкостей зависит не только от концентрации наночастиц в базовой жидкости и их формы.

Рассмотрены возможные причины того, что экспериментальные значения находятся преимущественно ниже теоретических предсказаний. Во-первых, материал наночастиц представляет собой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Эта модификация является устойчивой только для нанометрового (менее 50 нм) диапазона размеров, и теплопроводность $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ может отличаться от теплопроводности $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, значение которой хорошо известно. Однако, теплопроводность $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ на два порядка больше теплопроводности используемой в экспериментах базовой жидкости, и ролью этого фактора можно пренебречь, так как уже при отличии теплопроводностей на порядок формула дает хорошее приближение.

Во-вторых, в экспериментах использовались наночастицы несферической формы с удельной площадью поверхности $100 \text{ м}^2/\text{г}$, для которых влияние температурного скачка на границе частицы может оказаться существенным. В большинстве экспериментальных исследований полученные результаты сравнивают с теорией Максвелла для сферических частиц и с её модификацией для несферических частиц - теорией Гамильтона-Кроссера. При этом не рассматривается явление контактного теплового сопротивления Капицы, вклад которого может оказаться существенным при рассмотрении теплопереноса на межфазной границе частиц нанометрового размера. В данной работе сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическим анализом позволило приблизительно оценить величину теплового сопротивления для поверхности раздела $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ со смесью 90% этиленгликоля и 10% воды. Получена оценка величины поверхностного контактного сопротивления: $G \approx 21 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^2 \text{К}}{\text{Вт}}$.

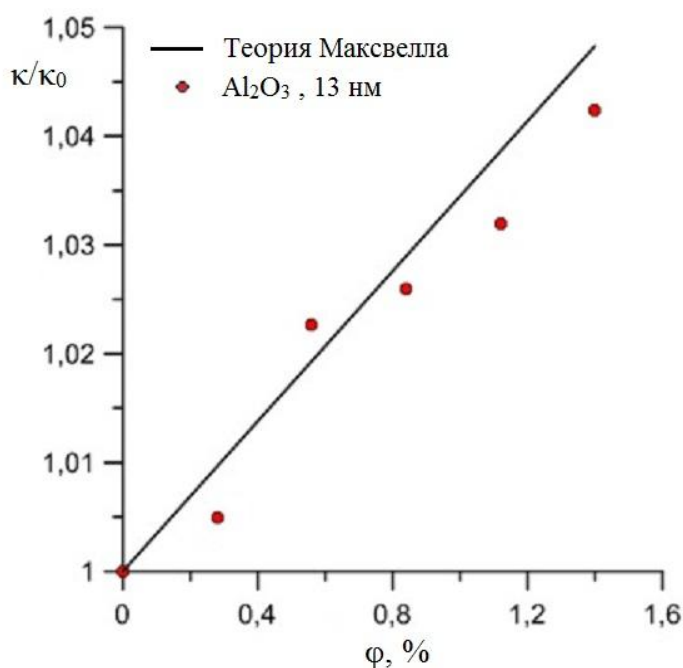


Рис. 7 Зависимость теплопроводности наножидкостей на основе смеси 90% этиленгликоля и 10% воды и наночастиц Al_2O_3 (Degussa) от объемной концентрации наночастиц ϕ .

В разделе 5.2 представлены результаты экспериментального исследования теплопроводности наножидкостей на основе сферических полых наночастиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с внешним радиусом 5 нм и радиусом полости около 2,5 нм. В качестве базовых жидкостей были использованы вода, этиленгликоль и изопропиловый спирт. Для воды и изопропилового спирта измерения проведены до объемного содержания наночастиц 1,5 %, а для этиленгликоля – до 2,5%.

Результаты измерений и теоретическая зависимость представлены на сводном графике (рис. 8). Все экспериментальные данные лежат существенно ниже теоретической зависимости. Соответствующий наклон составляет в сравнении теорией Максвелла 0,37, 0,27 и 0,17 для наножидкостей на основе этиленгликоля, изопропилового спирта и воды соответственно.

Отмечены три возможные причины того, что экспериментальные значения находятся ниже теоретических предсказаний. Во-первых, материал наночастиц представляет собой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Эта модификация является устойчивой только для нанометрового (менее 50 нм) диапазона размеров, и теплопроводность $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ может отличаться от теплопроводности $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, значение которой хорошо известно. Однако, теплопроводность $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ на два порядка больше теплопроводности используемой в экспериментах базовой жидкости, и ролью этого фактора можно пренебречь, так как уже при отличии теплопроводностей на порядок формула дает хорошее приближение. Во-вторых, в экспериментах использовались полые частицы, что естественно уменьшило поток тепла внутри частицы и повлияло на теплопроводность наножидкостей. В-третьих, в экспериментах использовались наночастицы радиусом менее 5 нм, для которых влияние температурного скачка на границе частицы может оказаться существенным.

Проведённые оценки влияния полости на теплопроводность наножидкости без учёта контактного теплового сопротивления ($\gamma = 0$) позволили исключить влияние наличия полости на наблюдаемый в экспериментах эффект.

Сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическим анализом позволило оценить величину теплового сопротивления для поверхности раздела $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с водой, изопропиловым спиртом (IPA) и этиленгликолем (EG). Получены следующие оценки величин поверхностного контактного сопротивления:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2,8 \cdot 10^{-9} \frac{\text{M}^2 \text{K}}{\text{Bm}}; G_{\text{IPA}} \approx 16 \cdot 10^{-9} \frac{\text{M}^2 \text{K}}{\text{Bm}}; G_{\text{EG}} \approx 24 \cdot 10^{-9} \frac{\text{M}^2 \text{K}}{\text{Bm}}.$$

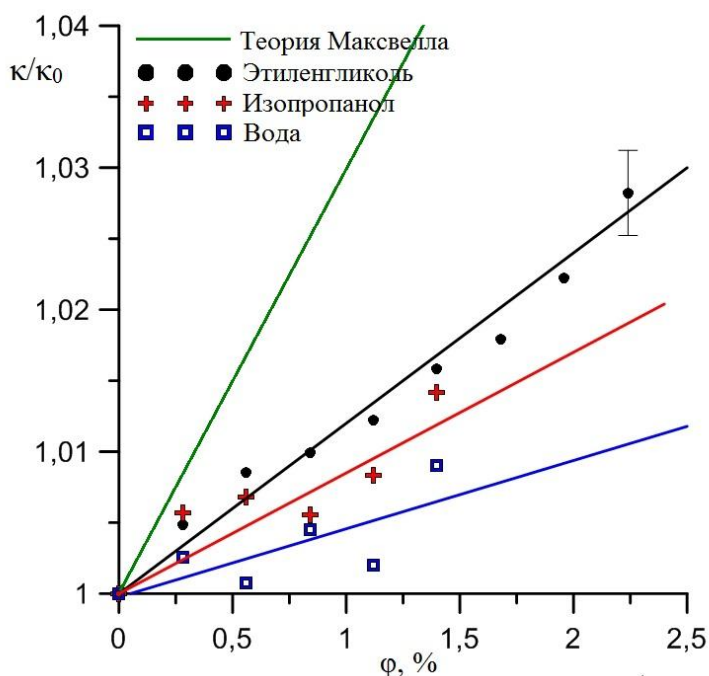


Рис. 8 Зависимость теплопроводности наножидкостей на основе полых наночастиц Al_2O_3 и базовых жидкостей: этиленгликоль, изопропанол, вода от объемной концентрации наночастиц ϕ .

В разделе 5.3 представлены результаты экспериментальных измерений теплопроводности наножидкости на основе химически модифицированных одностенных углеродных нанотрубок и

воды. Измерения проведены для наножидкостей с объемным содержанием наночастиц до 0,2 %. Получено, что теплопроводность наножидкости на основе одностенных углеродных нанотрубок растет по близкой к линейной зависимости и достигает значения, превышающего теплопроводность воды на 17 % для объемной концентрации 0,2 %.

Эксперименты, включающие синтез наножидкости, проводились многократно в течение двух недель и показывали повторяемость результатов. После второй недели эффект увеличения теплопроводности начал снижаться, а примерно через месяц новые образцы данной наножидкости начали терять устойчивость по отношению к агломерации. Анализ углеродных нанотрубок, представленный в разделе 2.1, показал, что исходный материал деградировал со временем.

В разделе 5.4 обобщены результаты экспериментального исследования теплопроводности наножидкостей.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы:

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. Отличие экспериментальных значений от предсказаний теории возрастает с ростом теплопроводности базовой жидкости.

2. Впервые предложен механизм для описания теплопроводности наножидкостей, связанный с уменьшением потоков тепла на границе частица – жидкость вследствие температурного скачка Капицы. Обоснованием для этого механизма являются: анализ теоретических зависимостей влияния размера частиц и теплопроводности базовой жидкости; анализ характерных величин контактных сопротивлений различных материалов, полученные экспериментальные данные.

3. Впервые решена задача о теплопроводности суспензий на основе сферических частиц в оболочке. Задача решена аналитически на основе подхода Максвелла. 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. 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 объемной 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 объемного содержания наночастиц.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в следующих работах:

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 нанотрубок // 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. – C. 1314-1319.