

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Морозовой Марины Анатольевны**

«ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Морозовой Марины Анатольевны «ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ» посвящена исследованиям вязкости и теплопроводности наножидкостей, в том числе исследованию влияния теплового контактного сопротивления Капицы на процессы теплопереноса в наножидкостях. Для достижения данной цели в диссертации были решены следующие задачи: экспериментально исследована теплопроводность и вязкость наножидкостей, проведен теоретический анализ влияния контактного теплового сопротивления Капицы на тепловые процессы в наножидкостях.

В настоящее время существует большое число исследований, посвященных изучению теплофизических свойств наножидкостей, в том числе, вязкости и теплопроводности. Изучены также различные варианты базовых жидкостей и наполнители в виде наночастиц (различные материалы, размеры наночастиц, их форма и т.д.). В многочисленных обзорах сделаны выводы о применимости тех или иных наножидкостей в различных приложениях. Вместе с тем, нет однозначного вывода об оптимальных свойствах наножидкостей, в том числе вязкости и теплопроводности, для конкретных применений. В представленной диссертационной работе сделан важный шаг к расширению наших знаний в области теплофизических свойств наножидкостей.

Актуальность темы диссертации связана с растущим интересом к фундаментальным свойствам наножидкостей и их многочисленными применениями в различных технологических процессах.

Научная новизна работы состоит в

- экспериментальном обнаружении, что зависимость теплопроводности наножидкостей на основе 10 нм частиц оксида алюминия лежит ниже значений, которые предсказывает теория Максвелла;

- проведении экспериментов для трех базовых жидкостей: воды, этиленгликоля и изопропилового спирта;
- впервые предложенном механизме для описания теплопроводности наножидкостей, связанным с уменьшением потоков тепла на границе частица – жидкость вследствие температурного скачка Капицы;
- впервые аналитически решенной задаче о теплопроводности суспензий на основе сферических частиц в оболочке;
- экспериментально зарегистрированном уменьшении вязкости наножидкости на основе смеси 90% этиленгликоля и 10% воды и наночастиц Al_2O_3 с увеличением скорости сдвига;
- нахождении того факта, что применение исследованных в данной 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 данной диссертации состоит в важном выводе, что исследованные в работе наножидкости не могут быть использованы в качестве эффективных теплоносителей. Вместе с тем, 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

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов измерений, проведением калибровочных измерений, анализом неопределенностей и воспроизводимостью полученных опытных данных в различных сериях экспериментов.

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.

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.

Во **второй главе** описаны исходные материалы, экспериментальные установки и методы исследования теплопроводности и вязкости наножидкостей. В **третьей главе** представлены 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 **пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования теплопроводности наножидкостей. В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы.

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

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

По диссертации имеются следующие замечания:

1. По мнению рецензента, название диссертации имеет слишком общий характер и больше относится к названию монографии.
2. Данное на стр.8 определение наножидкости слишком узкое. В настоящее время наножидкостью называют мультифазную систему с распределением наночастиц по определенному закону (не обязательно с равномерным распределением наночастиц в пространстве).
3. На стр.17 видимо, должно быть: уже для $k_p = 10k_f$ формула (1.1) дает результаты, близкие к формуле (1.2).
4. При рассмотрении результатов по вязкости наножидкостей, автор так и не приходит к какому-либо механизму, объясняющему рост вязкости, сильно не совпадающий с соотношением Бэтчелора. Следует отметить, что используемые в работе подходы никак не учитывают возможного сопротивления за счет соударений наночастиц со стенкой (трибологический вклад в локальное сопротивление).
5. В работе нет объяснения и зависимости вязкости от размеров наночастиц. Это тем более важно, что существуют современные исследования, которые не подтверждают столь

сильной зависимости для других материалов наночастиц. Неньтоновское поведение наножидкостей также остается до конца невыясненным. Наконец, отсутствуют температурные зависимости вязкости, что не позволяет связать вязкость и теплопроводность через какие-либо внутренние процессы (типа соотношений Эйнштейна).

6. При рассмотрении теплового сопротивления Капицы для наночастиц, автор утверждает, что в работе [88] такая задача решена. Следует отметить, что для решения такой задачи нельзя рассматривать простую тепловую задачу в рамках уравнения теплопроводности (приближение Фурье). Дело в том, что температура внутри наночастиц вообще не определена, поэтому граничные условия для нее или ее градиентов внутри наночастиц ставить нельзя. Конечно, в используемом автором приближении, возможно рассмотрение температурного скачка на границе (сопротивление Капицы), но в точной постановке внутри наночастиц можно использовать только микроскопическое приближение (типа уравнения Больцмана для фононов; аналогично теоретическому подходу Халатникова, который и объяснил впервые сопротивление Капицы). К тому же, наночастицы оксида алюминия, которые рассмотрены в работе, по своей структуре имеют непростой спектр фононов, вклад которого является основным в сопротивлении Капицы.

7. В главе 5 не указано, в каких температурных диапазонах измерялась теплопроводность наножидкостей. При исследовании теплопроводности наножидкостей на основе воды и одностенных углеродных нанотрубок не приведены теоретические кривые, что не позволяет понять увеличение теплопроводности на 17%.

Несмотря на сделанные замечания, в целом диссертационная работа Морозовой Марины Анатольевны «ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ», представляет законченное исследование по одному из важнейших направлений современной науки - теплофизике наножидкостей и их потенциальному использованию в различных приложениях. Тема работы весьма актуальна, научные положения диссертационной работы достаточно обоснованы, выбранные методы исследования адекватны рассматриваемым процессам. Новизна результатов работы не вызывает сомнений, выводы диссертационной работы и рекомендации также весьма обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Публикации, приведенные в списке литературы, правильно отражают результаты исследований и выводы, изложенные в диссертации.

Таким образом, диссертация Морозовой Марины Анатольевны «ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ» соответствует критериям,

установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры низких температур, заведующий
лабораторией Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва,
Красноказарменная улица, д. 14,
тел. 8 (495) 362-75-56,
asdmiriev@mail.ru

Александр Сергеевич
Дмитриев

 11.11.2019 2019 г.

Подпись Дмитриева Александра Сергеевича заверяю



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
ОТДЕЛА РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ
Л.И. ПОЛЕВАЯ