

УДК 536;532.584;538.93

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ НАНОЖИДКОСТЕЙ С ОДНОСТЕННЫМИ НАНОТРУБКАМИ

© 2022 г. В. Я. Рудяк<sup>1, 2, 3, 4, \*</sup>, А. В. Минаков<sup>1, 2, 3</sup>, М. И. Пряжников<sup>1, 2, 3</sup>, Д. В. Гузей<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: valery.rudyak@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2021 г.

После доработки 02.11.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

Статья посвящена экспериментальному изучению теплопроводности и теплоотдачи наножидкостей с одностенными нанотрубками. Измерена теплопроводность наножидкостей на основе этиленгликоля, воды и изопропилового спирта. Весовая концентрация углеродных трубок варьировалась от 0.05 до 0.5%. Показано, что во всех случаях коэффициент теплопроводности наножидкостей значительно повышается. Так, например, для наножидкости на основе изопропилового спирта при весовой концентрации 0.05% превышение коэффициента теплопроводности по сравнению с базовой жидкостью составило 10.5%, а при концентрации 0.25–51%. Представлены результаты измерения коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе изопропилового спирта в цилиндрическом канале. Коэффициент теплоотдачи наножидкости также имеет высокие значения: при концентрации трубок 0.25% коэффициент теплоотдачи в 1.5 раза выше, чем у базовой жидкости. Наряду с коэффициентом теплоотдачи систематически изучено падение давления в канале, для чего предварительно исследована вязкость используемых наножидкостей.

DOI: 10.31857/S0040364422030024

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к наножидкостям инициирован в первую очередь их возможными теплофизическими применениями. Перспективность использования наножидкостей связывалась с тем, что наночастицы (особенно металлические) имеют очень высокую теплопроводность. Естественно поэтому было ожидать, что и наножидкости, включающие наночастицы, будут иметь достаточно высокую теплопроводность. Существующие на сегодняшний день экспериментальные данные в целом подтверждают эту точку зрения (см. [1–5] и цитируемую там литературу), хотя первоначально ожидаемые значения теплопроводности оказались явно завышенными. Наножидкости с оксидными частицами превышают теплопроводность базовых флюидов на 15–30% при объемной концентрации частиц до 6–8%. Теплопроводность наножидкостей с металлическими наночастицами еще выше.

Вместе с обычными наножидкостями (со сферическими частицами), о которых речь шла выше, в литературе принято называть наножидкостями и такие, в которых в качестве дисперсных частиц ис-

пользуются углеродные нанотрубки (УНТ). В зависимости от технологии получения УНТ могут быть одностенными (ОУНТ) и многостенными (МУНТ). ОУНТ имеют характерный диаметр от ~1 до 2 нм, тогда как диаметр МУНТ может составлять десятки нанометров. Длина первых обычно меняется от сотен нанометров до нескольких микрометров, а у вторых – до сотен микрометров. Таким образом, отношение диаметра УНТ к их длине может составлять сотни и тысячи, и их нельзя считать обычными наночастицами, характерный размер которых не превышает 100 нм. Все УНТ имеют уникальные механические свойства, сочетая и высокую прочность, и высокую упругость, они могут быть проводящими или иметь полупроводниковые свойства.

УНТ имеют высокую теплоемкость [6], теплопроводность МУНТ превышает 3000 Вт/(м К), теплопроводность ОУНТ вдвое выше [7, 8]. Поэтому их использование в различных теплофизических приложениях представляется естественным. Такие приложения в значительной мере инициированы экспериментами [9], где указывалось, что наножидкость с концентрацией МУНТ 1% позволяет увеличить теплопроводность на 160%.

К настоящему времени опубликованы десятки статей, посвященных экспериментальному изучению теплопроводности наножидкостей с УНТ (см., например, статьи [10–14] и цитируемую в них литературу). Однако полученные результаты оказались чрезвычайно разнородными и достаточно противоречивыми. Причин этому несколько. Во-первых, в работах использовались различные УНТ. Наножидкости с ОУНТ и МУНТ в общем случае имеют существенно разные свойства, и теплопроводность в частности. Кроме того, свойства УНТ зависят от технологии их получения. Поэтому сами УНТ, используемые для приготовления наножидкостей, могут оказаться разными. Например, доля углерода может колебаться от 70 до 99%. Во-вторых, для приготовления наножидкостей с УНТ, как правило, используются различные поверхностно активные вещества (ПАВ). В результате базовые жидкости часто оказываются различными, что существенно меняет свойства получаемых наножидкостей. Поскольку в качестве ПАВ обычно берутся высокомолекулярные соединения, то базовые жидкости чрезвычайно чувствительны к ультразвуковой обработке. В статьях же иногда вообще не указывается время такой обработки и закачиваемая в жидкость мощность. Наконец, нередко сопоставляются данные при разных температурах. Рамки этого раздела не позволяют сделать сколько-нибудь полный обзор полученных в последние два десятилетия данных, поэтому здесь ограничимся лишь формулированием наиболее надежных выводов.

Прежде всего, надо разделить наножидкости с ОУНТ и МУНТ. Обычно в качестве базовых при приготовлении наножидкостей используются вода и этиленгликоль с различными ПАВ. Весовая концентрация МУНТ варьируется от 0.05 до 3%. Диаметры нанотрубок различны – от 20 до 150 нм, длина трубок также изменяется в широких пределах: от 5 мкм до 30 мм. Зарегистрированное повышение коэффициента теплопроводности над соответствующим значением базовой жидкости составляло от 2.3 до 79% [10–20].

Работ, в которых исследуется теплопроводность наножидкостей с ОУНТ, примерно на порядок меньше, чем с МУНТ. Здесь концентрации нанотрубок изменяются в тех же пределах, а повышение коэффициента теплопроводности составляет от 10 до 36% [10–14, 21–25]. Однако, говоря о повышении коэффициента теплопроводности, всегда следует понимать, что теплопроводность первичной базовой жидкости (например, воды или этиленгликоля) может существенно отличаться от конечной базовой жидкости (с добавлениями ПАВ). Даже малая концентрация ПАВ в ряде случаев существенно уменьшает теплопроводность первичной базовой жидкости. Такое уменьшение фиксируется при использовании многих ПАВ [11].

Зависимость от температуры теплопроводности наножидкостей с УНТ в общем случае традиционная: с ростом температуры теплопроводность наножидкостей растет. Однако наличие ПАВ может существенно изменить эту зависимость. Так, при использовании ряда ПАВ с ростом температуры теплопроводность наножидкостей падает [11, 17].

Представленный краткий обзор показывает, что данные по теплопроводности наножидкостей с УНТ весьма различны. Связано это, в частности, с тем, что в большинстве работ исследовались совершенно разные наножидкости. Поэтому нельзя ожидать появления каких-либо общих выводов. Нельзя, таким образом, получить и возможность предсказывать теплопроводность тех или иных наножидкостей. Для этого необходимо исследовать конкретные классы наножидкостей, дифференцируя наножидкости с МУНТ и ОУНТ, базовыми жидкостями и ПАВ. Целью данной работы является экспериментальное изучение теплопроводности и коэффициента теплоотдачи наножидкостей на основе этиленгликоля (ЭГ), воды (В) и изопропилового спирта (ИПС) с ОУНТ. Использовались ОУНТ, произведенные компанией OCSiAl (Новосибирск). В настоящее время эти нанотрубки широко применяются для разнообразных приложений, что объясняет актуальность изучения свойств наножидкостей именно с такими нанотрубками. Помимо этого, в работе проведено прямое сопоставление коэффициента теплопроводности наножидкостей с ОУНТ с коэффициентами теплопроводности наножидкостей с металлическими и оксидными наночастицами. Представлены результаты измерения коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе изопропилового спирта в цилиндрическом канале. Исследована вязкость и реология используемых наножидкостей для изучения изменения давления.

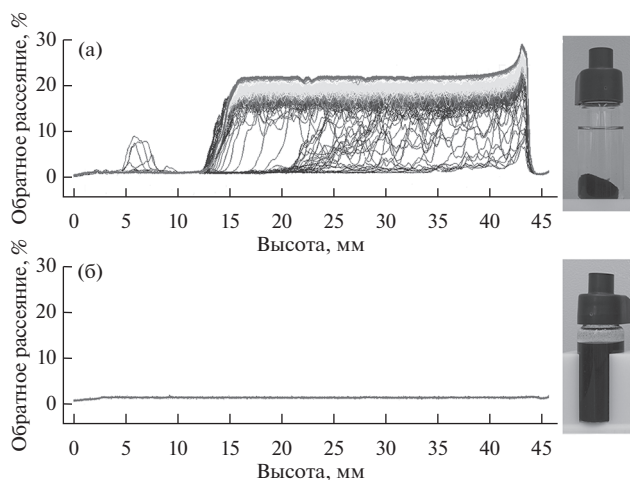
## ПРИГОТОВЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА НАНОЖИДКОСТЕЙ

В использованных в настоящей работе порошках ОУНТ по данным термогравиметрического анализа содержание трубок по массе равно  $75 \pm 1\%$ . Еще  $\sim 11\%$  составляли углеродные наночастицы, а остальное – металлические примеси. Диаметр ОУНТ, определенный с помощью КР-спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния), составляет  $1.6 \pm 0.4$  нм. Полная удельная поверхность по БЭТ-методу [26] –  $500$  м<sup>2</sup>/г, а их средняя плотность –  $1.8$  г/см<sup>3</sup>. По данным атомно-силовой микроскопии длина ОУНТ превышала 4 мкм. Между ОУНТ действуют большие силы Ван-дер-Ваальса. Наличие таких взаимодействий приводит к возможному образованию агломератов, поэтому в исходном порошке ОУНТ и содержатся преимущественно в виде агломератов.

Все изученные в данной работе наножидкости были приготовлены двухшаговым методом. На первом шаге к определенному объему базовой жидкости добавляется необходимое по весу количество нанопорошка и полученная первичная наножидкость механически перемешивается. Изучалась теплопроводность наножидкостей на основе ИПС, ЭГ и В. В последнем случае в качестве ПАВ использовался додецилсульфат натрия (СДС) с весовой концентрацией 1%. При использовании ПАВ сначала создается базовая жидкость, к исходной базовой жидкости (В или ЭГ) добавляется необходимое количество ПАВ. Получающаяся первичная наножидкость характеризуется определенной концентрацией ПАВ и ОУНТ. Чтобы минимизировать наличие в наножидкости пучков УНТ, на втором шаге первичная наножидкость подвергается ультразвуковой обработке (УЗО) с помощью установки “Volna” UZTA-0.4/22-OM ( $22 \pm 1.65$  кГц, 400 Вт). УЗО первичной наножидкости продолжалась 90 мин. Расщепление пучков УНТ происходит в несколько стадий и удачно названо “растегивающейся молнией” [27].

Качество получаемой при этом наножидкости контролировалось несколькими способами. Прежде всего, использовалась электронная микроскопия. В результате УЗО действительно удается разрушить большинство агломератов. По полученным фотографиям помимо изолированных трубок были выделены и их пучки диаметром около 5 и 20–40 нм. Кроме того, качество и стабильность наножидкостей контролировались по так называемой оптической плотности (прозрачности). С этой целью использовались спектрофотометр UV-3600 и анализатор коллоидной устойчивости Turbiscan. Контроль с помощью данных приборов при УЗО позволяет создать достаточно однородные и устойчивые наножидкости. Одновременно это дает возможность найти верхнюю границу необходимой мощности УЗО. Обычно при дальнейшем продолжении УЗО качество наножидкости практически не меняется.

Работа анализатора Turbiscan основана на методе многократного рассеяния света. Исследуемый образец (20 мл) помещался в стеклянную вialу. В качестве источника излучения использовался лазерный диод ближней ИК-области (880 нм). Два синхронных оптических сенсора измеряют интенсивность прошедшего через образец излучения и излучения, рассеянного образцом в обратном направлении. Анализатор сканирует образец по высоте вialы (до 55 мм), производя измерение пропускания и обратного рассеяния каждые 40 мкм. На рис. 1 в качестве примера показаны профили обратного рассеяния для наножидкости на основе ИПС при концентрации ОУНТ, равной 0.05%, без УЗО и после 90 мин УЗО. В последнем случае измеренный сигнал оказывается устойчивым и однородным, что и свидетельствует об однород-



**Рис. 1.** Сигнал обратного рассеяния наножидкости на основе ИПС с весовой концентрацией ОУНТ 0.05% без УЗО (а) и после 90 мин УЗО (б).

ности и устойчивости полученной наножидкости. На это указывают и фотографии вial с наножидкостями справа.

В общем случае время УЗО, конечно, зависит от концентрации ОУНТ. Соответствующий контроль осуществлялся с помощью акустического и электроакустического спектрометра DT1202. Акустический метод основан на измерении степени ослабления ультразвукового сигнала и используется для определения размеров частиц, в том числе в непрозрачных и концентрированных средах. Ультразвуковые волны рассеиваются на частицах, что приводит к изменениям в спектре ультразвукового сигнала. На основе спектра ослабленного сигнала и по скорости звука рассчитывается средний размер частиц и распределение частиц по размерам. Пример изменения среднего размера ОУНТ в результате УЗО представлен на рис. 2. Здесь сопоставлены распределения ОУНТ в наножидкостях на основе ИПС с весовой концентрацией ОУНТ 0.1% после 10 (кривая 1) и 90 мин (кривая 2) УЗО. Средний размер после 10 мин УЗО равен 0.52 мкм, а после 90 мин – 0.43 мкм.

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ С ОУНТ

В данной работе изучалась теплопроводность наножидкостей на основе ИПС, ЭГ и В + СДС. Весовая концентрация ОУНТ варьировалась от 0.05 до 0.5%. Все представленные ниже измерения выполнены при температуре 25°C. Коэффициент теплопроводности измерялся на установке, разработанной авторами на основе метода нагреваемой нити. Установка систематически описана и тестируется в работе [28]. Позднее с ее помощью измерена теплопроводность нескольких десятков наножидкостей на основе воды, этиленгликоля и

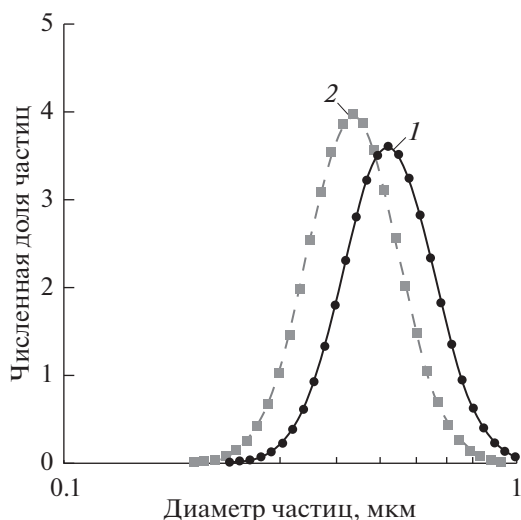


Рис. 2. Распределения по размерам ОУНТ при их концентрации 0.1% в наножидкости на основе ИПС при различном времени УЗО: 1 – 10 мин, 2 – 90 мин.

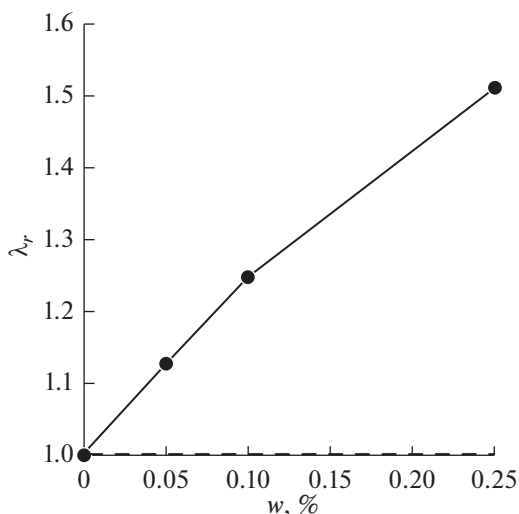


Рис. 3. Зависимости относительного коэффициента теплопроводности наножидкости на основе ИПС от весовой концентрации ОУНТ.

машинного масла с различными частицами [5]. Проведенные тесты показали, что точность измерения – не ниже 3%.

На первом этапе изучено влияние времени обработки ультразвуком на свойства наножидкостей. Ниже в качестве примера приводятся данные для наножидкости на основе ИПС. Представлены данные для двух весовых концентраций нанотрубок (0.05 и 0.1%). Время УЗО варьировалось от 10 до 200 мин. Результаты влияния времени УЗО на коэффициент теплопроводности наножидкостей с ОУНТ приведены в табл. 1. С увеличением времени УЗО коэффициент теплопроводности наножидкости несколько снижается, но если обработка длилась более 90 мин, то коэффициент теплопроводности практически не меняется (в пределах точности измерения). Стоит отметить, что с увеличением концентрации УНТ время УЗО должно увеличиваться.

Зависимости относительного коэффициента теплопроводности  $\lambda_r = \lambda/\lambda_0$  ( $\lambda$  и  $\lambda_0$  – соответственно коэффициенты теплопроводности наножидкости и ИПС) от весовой концентрации ОУНТ  $w$  для наножидкости на основе ИПС при-

ведены на рис. 3. Теплопроводность наножидкостей значительно выше теплопроводности базового флюида. При минимальной концентрации ОУНТ (0.05%) она превышает теплопроводность ИПС на 10.5%, а при максимальной (0.25%) – на 51%. Стоит отметить, что объемные концентрации частиц при этом примерно вдвое ниже. Коэффициент теплопроводности наножидкости почти в 70 раз больше значения, предсказываемого классической теорией Максвелла [29] для крупнодисперсных жидкостей (пунктирная линия на рис. 3).

При изучении наножидкостей с обычными сферическими частицами установлено, что важным фактором, определяющим их теплопроводность, является базовая жидкость. Показано, что повышение теплопроводности в наножидкости будет тем выше, чем ниже теплопроводность базовой жидкости (см. [5, 30]). Подобная ситуация реализуется и в наножидкостях с ОУНТ. Зависимость относительного коэффициента теплопроводности наножидкостей на основе трех разных базовых флюидов от концентрации ОУНТ приведена на рис. 4. Максимальный коэффициент теплопроводности из всех рассмотренных жидкостей имеет вода, далее ЭГ, а затем ИПС. Рис. 4 показывает, что, как и для наножидкостей со сферическими частицами, теплопроводность наножидкостей с ОУНТ тем выше, чем ниже теплопроводность базовой жидкости. При концентрации нанотрубок 0.25% в наножидкости на основе В + СДС коэффициент теплопроводности увеличивается на 13%, на основе ЭГ – на 24%, а на основе ИПС – на 51%. Точные значения коэффициента теплопроводности для этих трех наножидкостей приведены в табл. 2. Таким образом, использование наножидкости в качестве хлад-

Таблица 1. Влияние длительности обработки ультразвуком на относительный коэффициент теплопроводности наножидкостей на основе ИПС с ОУНТ

$t$ , мин	$\lambda/\lambda_0$	$t$ , мин	$\lambda/\lambda_0$
60	1.136	10	1.278
90	1.125	90	1.246
200	1.123	200	1.243
0.05% ОУНТ		0.10% ОУНТ	

агента будет тем эффективнее, чем ниже теплопроводность базовой жидкости.

На практике в качестве хладагента нередко используется вода. По этой причине на рис. 4 приведены данные для наножидкости на основе В + СДС при концентрации ОУНТ, равной 0.5%. Теплопроводность повышается в этом случае на 13.5%. Необходимо, однако, иметь в виду следующее. Раствор В + СДС при температуре 25°C имеет теплопроводность почти на 20% ниже, чем у воды [17]. Наконец, повышение коэффициента теплопроводности можно существенно увеличить, если использовать смесь воды и этиленгликоля.

Теплопроводность наножидкостей с обычными сферическими частицами к настоящему времени достаточно хорошо изучена. Прежде всего, установлено, что она не описывается классической теорией Максвелла [29] и ее обобщениями. Коэффициент теплопроводности, как правило, существенно превышает значение, предсказываемое этой теорией. В наножидкостях с частицами оксидов металлов теплопроводность повышается на 15–30% при объемной концентрации частиц 6–8% (см. [5] и цитируемую там литературу). В наножидкостях с металлическими частицами можно ожидать еще больших значений теплопроводности, но производство соответствующих наножидкостей требует существенно больших усилий. Более концентрированные (при концентрации наночастиц свыше 6–8%) стабильные наножидкости делать фактически не удается, во всяком случае их практическое применение весьма проблематично. Второе важное обстоятельство состоит в том, что теплопроводность наножидкостей зависит также от размера частиц, причем она увеличивается с ростом размера частиц, но в любом случае повышение теплопроводности оказывается порядка 15–30%. Более того, если размер наночастиц достаточно мал, то теплопроводность наножидкостей может не превышать значений, предсказываемых теорией Максвелла, или быть даже ниже [5, 31].

В данной работе исследовалась теплопроводность наножидкостей с ОУНТ при существенно меньших их концентрациях. Интересно и важно с практической точки зрения сопоставить значения получаемых повышенных коэффициентов теплопроводности для наножидкостей со сферическими наночастицами и с ОУНТ. Такое сопоставление выполнено на рис. 5. Здесь сравниваются данные для наножидкостей на основе воды с частицами оксидов металлов [5] и алюминия. Теплопроводность наножидкости с частицами алюминия измерена специально для данной работы. Наножидкость с ОУНТ приготовлена на основе воды и СДС. Во всех остальных случаях ПАВ не использовались. Максимальная концен-

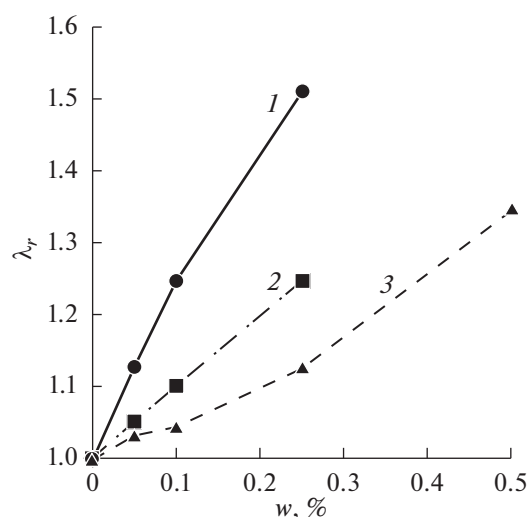


Рис. 4. Зависимости относительного коэффициента теплопроводности от весовой концентрации наножидкости с ОУНТ на основе ИПС (1), ЭГ (2), В + СДС (3).

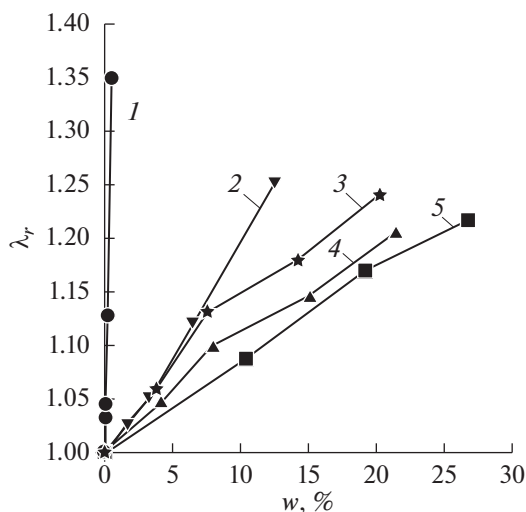
трация ОУНТ составляла 0.25%. Данные рис. 5 хорошо иллюстрируют преимущества использования в наножидкостях ОУНТ по сравнению с обычными наночастицами. Для увеличения коэффициента теплопроводности наножидкости на 20–25% необходима весовая концентрация металлических наночастиц ~10%, оксидных наночастиц — 20–25%. С другой стороны, 35%-ное повышение коэффициента теплопроводности наножидкости с ОУНТ требует их концентрации примерно на два порядка меньше перечисленных значений.

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ

Высокая относительная теплопроводность наножидкостей с ОУНТ, продемонстрированная в предыдущем разделе, свидетельствует о том, что использование таких наножидкостей в различных теплообменных устройствах весьма перспективно. Это почти очевидно при ламинарном режиме течения, поскольку в этом случае теплооб-

Таблица 2. Коэффициент теплопроводности наножидкости при различной весовой концентрации ОУНТ, Вт/(м К)

$w, \%$	В + СДС	ЭГ	ИПС
0	0.608	0.252	0.141
0.05	0.628	0.284	0.148
0.10	0.635	0.314	0.155
0.25	0.685	0.381	0.176
0.50	0.820	—	—



**Рис. 5.** Зависимости относительного коэффициента теплопроводности наножидкостей на основе воды с различными наночастицами и ОУНТ: 1 – ОУНТ, 2 – Al (90 нм), 3 –  $Al_2O_3$  (150 нм), 4 –  $TiO_2$  (150 нм), 5 –  $ZrO_2$  (105 нм).

мен наножидкости определяется в основном теплопроводностью рабочей жидкости [32, 33]. Конечно, использование наножидкостей с ОУНТ имеет свои важные особенности, для изучения которых необходимо проведение соответствующих экспериментов. В этом разделе приведены данные измерения коэффициента теплоотдачи в цилиндрическом канале наножидкости на основе ИПС с ОУНТ. Эксперименты выполнялись на установке, которая ранее использовалась в работах [32–34] при измерении коэффициента теплоотдачи в течениях наножидкостей с обычными частицами. Установка представляет собой замкнутый контур с циркулирующим теплоносителем. С помощью насоса рабочая жидкость прокачивается через измерительный обогреваемый участок. После прохождения измерительного участка рабочая жидкость поступает в теплообменник, в котором отдает тепло термостату. Контроль расхода жидкости в контуре осуществляется при помощи скоростного расходомера.

Обогреваемый участок представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 10 мм и длиной 1 м. Толщина стенки трубки – 1 мм. Нагрев трубки осуществляется путем подачи электрического тока непосредственно на ее стенку. Такой способ позволяет получить нагрев с постоянной плотностью теплового потока на стенке. Трубка теплоизолирована. Мощность нагрева регулируется при помощи изменения напряжения подаваемого на трансформатор тока. В ходе эксперимента измерялась сила тока, пускаемая на стенку трубки. Для измерения локальной температуры трубки на стенках на равном расстоянии

друг от друга закреплялись шесть медь-константановых термопар. Измерения температуры осуществлялись измерителями ТРМ-200. Помимо этого, при помощи термопар измерялась температура теплоносителя на входе и выходе из обогреваемого участка. Участок контура от обогревателя до места измерения температуры теплоносителя был также теплоизолирован. Измерения перепада давления проводились при помощи дифференциального манометра ОВЕН ПД200. Установка позволяет проводить измерения локального и среднего коэффициентов теплоотдачи и перепада давления до значений числа Рейнольдса для воды  $\sim 2 \times 10^4$ . Точность измерения температуры составляла  $\sim 0.1^\circ C$ , перепад давления измерялся с точностью 1%. Погрешность измерения расхода не превышает 1%.

В процессе экспериментов определялся локальный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = GC_p(T_i - T_o)S^{-1}(T_w - \bar{T})^{-1}.$$

Здесь  $C_p = \rho^{-1}[(1 - \phi)\rho_f C_{pf} + \phi\rho_p C_{pp}]$  – теплоемкость наножидкости;  $\rho_f$  и  $\rho_p$  – плотности базовой жидкости и материала наночастицы;  $C_{pf}$  и  $C_{pp}$  – теплоемкости несущей жидкости и материала частиц соответственно;  $\phi$  – объемная концентрация УНТ;  $\bar{T} = (T_i + T_o)/2$  – средняя температура жидкости;  $T_i, T_o$  – соответственно температура на входе и выходе из обогреваемого участка;  $T_w$  – локальная температура стенки канала;  $G$  – массовый расход;  $S$  – площадь поверхности обогреваемого участка. Наряду с локальным коэффициентом теплообмена определялся и средний

$$\bar{\alpha} = GC_p(T_i - T_o)S^{-1}(\bar{T}_w - \bar{T})^{-1},$$

где  $\bar{T}_w$  – средняя арифметическая температура стенки канала, полученная осреднением по данным шести термопар.

Сопоставление зависимости среднего коэффициента теплопередачи от массового расхода наножидкости на основе ИПС при концентрации ОУНТ, равной 0.1 и 0.25%, представлено на рис. 6. Использование наножидкостей значительно повышает среднее значение коэффициента теплоотдачи, при концентрации ОУНТ 0.25% коэффициент теплоотдачи увеличился почти в 1.5 раза. Такое увеличение коэффициента теплоотдачи с помощью наножидкостей с частицами оксидов металлов практически недостижимо. Это чрезвычайно сложно реализовать и для наножидкостей с металлическими наночастицами, здесь потребовались бы очень высокие концентрации частиц (десятки процентов по весу).

Таким образом, если стоит задача максимально повысить значение коэффициента теплоотда-

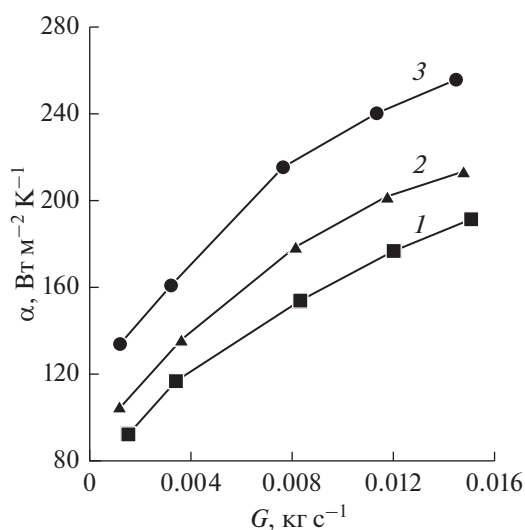


Рис. 6. Сопоставление зависимости среднего коэффициента теплопередачи от массового расхода для ИПС (1) и наножидкостей на основе ИПС с ОУНТ: 2 – 0.1%, 3 – 0.25%.

чи при конвективном теплообмене, то ОУНТ не имеют конкурентов среди других наночастиц. Вместе с тем известно, что вязкость обычных наножидкостей существенно превышает вязкость базовых жидкостей (см. [35] и цитируемую там литературу). Более того, с добавлением наночастиц реологические свойства флюида могут меняться [36]. Аналогичная ситуация реализуется и в наножидкостях с ОУНТ. Их реологические свойства практически всегда становятся неньютоновскими, если только концентрации ОУНТ не слишком малы [37]. Реологические свойства и вязкость наножидкости на основе ИПС с ОУНТ также изучены в [37]. Установлено, что данная наножидкость действительно является неньютоновской при всех рассмотренных концентрациях ОУНТ. Во всех случаях эти наножидкости являются вязкопластическими, и их реология хорошо описывается моделью Хершеля–Балкли. Это, в частности, означает, что течение жидкости начинается лишь по достижении некоторого критического значения скорости сдвига, причем это значение растет с увеличением концентрации ОУНТ. Стоит отметить также, что обычно индекс жидкости уменьшается, а параметр консистентности, напротив, растет с увеличением концентрации ОУНТ. Реологические свойства наножидкости могут меняться и с ростом температуры.

Таким образом, при изучении теплоотдачи важной характеристикой является и падение давления вдоль канала. Данные измерения падения давления вдоль канала в зависимости от массового расхода представлены на рис. 7, который показывает, что потери давления при прокачивании наножидкости с ОУНТ существенно превышают

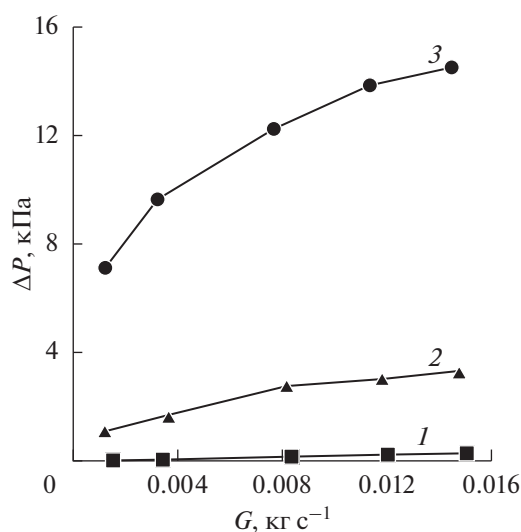


Рис. 7. Зависимости перепада давления от расхода для наножидкости на основе ИПС: 1 – ИПС, 2 – ИПС + 0.1% ОУНТ, 3 – ИПС + 0.25% ОУНТ.

соответствующие значения для ИПС. Подводя итог, следует отметить, что наножидкости превосходят базовые по коэффициенту теплоотдачи, но для их прокачки требуются значительно большие затраты энергии. Поэтому с практической точки зрения для повышения теплогидравлической эффективности наножидкостей с ОУНТ можно рекомендовать использовать их при более высокой входной температуре теплоносителя. При этом вязкость наножидкости будет существенно снижаться, а коэффициент теплопроводности возрастать.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье изучена теплопроводность трех наножидкостей на основе ИПС, ЭГ и В + СДС с ОУНТ. При весовой концентрации 0.25% в наножидкости на основе В + СДС коэффициент теплопроводности увеличивается на 13%, на основе ЭГ – на 24%, на основе ИПС – на 51%. Это делает ОУНТ чрезвычайно перспективным материалом для повышения теплопроводности теплоносителей. Близкие результаты для наножидкости на основе воды получены в работе [23]. Здесь при той же концентрации увеличение теплопроводности составляет ~11%. В работе [22] указывается, что при весовой концентрации ОУНТ 1.14% теплопроводность повышается на 19.4%, но более высокая концентрация трубок.

ПАВ – обычно диэлектрические жидкости, и их использование приводит к снижению теплопроводности базовой жидкости по сравнению с первичной. Естественным следствием является и общее снижение теплопроводности наножидкости. По этой причине в ряде случаев для создания наножидкостей применяется функционализация

УНТ [23, 38–40]. Известны разные ее способы. В полярных средах успешно используется жидкофазное или газофазное окисление УНТ различными реагентами. В неполярных органических растворителях требуются более сложные методы функционализации с использованием, например, полистирола и полиизопрена, карбоксильных групп и т.д. Функционализация, однако, обычно существенно меняет свойства УНТ, поэтому в данной работе она не применялась.

Наножидкости с УНТ на основе ЭГ также достаточно часто исследовались. С ОУНТ таких исследований, однако, немного. Авторам неизвестны работы, где используется ЭГ без ПАВ. В [41] в качестве ПАВ использовалась соль желчи и при объемной концентрации 0.225% повышение коэффициента теплопроводности составило 15%. Можно упомянуть и работу [26], где использовались ОУНТ, функционализированные гидроксильными группами (–COOH). Здесь при объемной концентрации ОУНТ ~2.16% повышение теплопроводности составило 36%, что несколько выше значения, полученного в данной работе, однако существенно выше и концентрации.

Стоит также отметить, что во всех случаях теплопроводность наножидкостей с ОУНТ не описывается классическими теориями, включая теорию Максвелла для крупнодисперсных жидкостей, последняя дает увеличение теплопроводности почти на два порядка меньше (см. рис. 4), чем наножидкость на основе ИПС. Как и для обычных наножидкостей, базовая жидкость также существенно влияет на теплопроводность наножидкости с ОУНТ. Относительный коэффициент теплопроводности наножидкостей тем выше, чем ниже коэффициент теплопроводности базовой жидкости.

Измерение коэффициента теплоотдачи также показало очень высокие его значения для наножидкости. При концентрации ОУНТ 0.25% коэффициент теплоотдачи наножидкости на основе ИПС увеличился в 1.5 раза по сравнению с ИПС. Таким образом, если стоит задача максимально повысить значение коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене, то использование ОУНТ не имеет конкурентов. Вместе с тем наножидкости даже при не очень высоких концентрациях ОУНТ оказываются неньютоновскими. В примере, приведенном в данной статье, наножидкости являлись вязкопластическими. С ростом концентрации ОУНТ индекс жидкости снижается, а параметр консистенции увеличивается. В результате падение давления при течении наножидкости с ОУНТ оказывается значительно больше, чем у базовой жидкости. Однако если наножидкость повышает коэффициент теплоотдачи по сравнению с чистой жидкостью при фиксированном значении перепада давления, то

она является эффективной. С наножидкостями обычно так дело и обстоит.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 20-19-00043).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang X.-Q., Mujumdar A.S. Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review // *Int. J. Thermal Sci.* 2007. V. 46. P. 1.
2. Daungthongsuk W., Wongwises S. A Critical Review of Convective Heat Transfer of Nanofluids // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2007. V. 11. P. 797.
3. Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // *Heat Transfer Eng.* 2008. V. 29. P. 432.
4. Kleinstreuer K., Yu F. Experimental and Theoretical Studies of Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement: A Review // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. № 229. P. 22.
5. Pryazhnikov M.I., Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Guzei D.V. Thermal Conductivity Measurements of Nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 104. № 1. P. 1275.
6. Рехвиашвили С.Ш., Сокуров А.А., Бухурова М.М. Теплоемкость упорядоченного массива одностенных углеродных нанотрубок // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 4. С. 524.
7. Kim P., Shi L., Majumdar A., McEuen P.L. Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87. P. 215502.
8. Yu C., Shi L., Yao Z., Li D., Majumdar A. Thermal Conductance and Thermopower of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube // *Nano Lett.* 2005. V. 5. P. 1842.
9. Choi S., Zhang Z., Yu W., Lockwood F., Grulke E. Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. № 14. P. 2252.
10. Younes H., Christensen G., Li D., Hong H., Ghaferi A.A. Thermal Conductivity of Nanofluids: Review // *J. Nanofluids.* 2015. V. 4. № 2. P. 107.
11. Estellé P., Halelfadl S., Maré M. Thermal Conductivity of CNT Water Based Nanofluids: Experimental Trends and Models Overview // *J. Therm. Eng.* 2015. V. 1. № 2. P. 381.
12. Soltanimehr M., Afrand M. Thermal Conductivity Enhancement of COOH Functionalized MWCNTs/Ethylene Glycol–Water Nanofluid for Application in Heating and Cooling Systems // *Appl. Therm. Eng.* 2016. V. 105. P. 716.
13. Tawfik M.M. Experimental Studies of Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement and Applications: A Review // *J. Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017. V. 75. P. 1239.
14. Akhilesh M., Santarao K., Babu M.V.S. Thermal Conductivity of CNT-Watered Nanofluids: A Review // *Mech. Mech. Eng.* 2018. V. 22. № 1. P. 207.
15. Assael M.J., Metaxa I.N., Arvanitidis J., Christofilos D., Lioutas C. Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Dif-



- ferent Dispersants // *Int. J. Thermophys.* 2005. V. 26. P. 647.
16. *Ding Y., Alias H., Wen D., Williams R.A.* Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids) // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2006. V. 49. № 1–2. P. 240.
  17. *Sadri R., Ahmadi G., Togun H., Dahari M., Kazi S.N., Sadeghinezhad E., Zubir N.* An Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes // *Nanoscale Res. Lett.* 2014. V. 9. P. 151.
  18. *Singh N., Chand G., Kanagaraj S.* Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Carbon Nanotubes–Ethylene Glycol Nanofluids // *Heat Transfer Eng.* 2012. V. 33. № 9. P. 821.
  19. *Liu M.S., Lin M.C.C., Wang C.C.* Enhancements of Thermal Conductivities with Cu, CuO, and Carbon Nanotube Nanofluids and Application of MWNT/Water Nanofluid on a Water Chiller System // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. № 297. P. 1.
  20. *Mirbagheri M.H., Akbari M., Mehmandoust B.* Proposing a New Experimental Correlation for Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes Suspended in a Binary Base Fluid // *Int. Comm. Heat Mass Transfer.* 2018. V. 98. P. 216.
  21. *Chen L., Xie H.* Surfactant-Free Nanofluids Containing Double- and Single-Walled Carbon Nanotubes Functionalized by Wet-Mechanochemical Reaction // *Thermochim. Acta.* 2010. № 1–2. P. 67.
  22. *Choi T.Y., Maneshian M.H., Kang B., Chang W.S., Han C.S., Poulikakos D.* Measurement of the Thermal Conductivity of a Water-Based Single-Walled Carbon Nanotube Colloidal Suspension with a Modified 3- $\omega$  Method // *Nanotechnology.* 2009. V. 20. P. 315706.
  23. *Harish C., Ishikawa K., Einarsson E., Aikawa S., Chiashi S., Shiomi J., Maruyama S.* Enhanced Thermal Conductivity of Ethylene Glycol with Single-Walled Carbon Nanotube Inclusions // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2012. V. 55. № 13–14. P. 3885.
  24. *Harish C., Ishikawa K., Einarsson E., Aikawa S., Inoue T., Zhao P., Watanabe M., Chiashi S., Shiomi J., Maruyama S.* Temperature-Dependent Thermal Conductivity Increase of Aqueous Nanofluid with Single-Walled Carbon Nanotube Inclusion // *Mater. Express.* 2012. V. 2. № 3. P. 213.
  25. *Nanda J., Maranville C., Bollin S.C., Sawall D., Ohtani H., Remillard J.T., Ginder J.M.* Thermal Conductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Dispersions: Role of Interfacial Effects // *J. Phys. Chem. C.* 2008. V. 112. № 3. P. 654.
  26. *Brunauer S., Emmett P.H., Teller E.* Adsorption of Gases in Multimolecular Layers // *J. Am. Chem. Soc.* 1938. V. 60. № 2. P. 309.
  27. *Strano J.M., Moore V.C., Miller M.K., Allen M.J., Haroz E.H., Kittrell C., Hauge R.H., Smalley R.E.* The Role of Surfactant Adsorption During Ultrasonication in the Dispersion of Single-Walled Carbon Nanotubes // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2003. V. 3. P. 81.
  28. *Минаков А.В., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Прыажников М.И., Лобасов А.С.* Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // *ИФЖ.* 2015. Т. 88. № 1. С. 148.
  29. *Maxwell J.C.* A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1881. 513 p.
  30. *Xie H., Lee H., Youn W., Choi M.* Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and their Enhanced Thermal Conductivities // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. № 8. P. 4967.
  31. *Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л.* Моделирование коэффициента вязкости наножидкости методом молекулярной динамики // *ЖТФ.* 2015. Т. 85. № 6. С. 9.
  32. *Минаков А.В., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Лобасов А.С.* Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 2. С. 256.
  33. *Guzei D.V., Minakov A.V., Rudyak V.Ya.* On the Efficiency of Convective Heat Transfer of Nanofluids in Laminar Flow Regime // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2019. V. 139. P. 180.
  34. *Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я.* Исследование теплоотдачи наножидкостей в турбулентном режиме течения в цилиндрическом канале // *Изв. РАН. МЖГ.* 2016. № 2. С. 65.
  35. *Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Pryazhnikov M.I.* Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids // *Heat Transfer Eng.* 2021. V. 42. № 12. P. 1024.
  36. *Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Pryazhnikov M.I.* Rheological Behavior of Water, and Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Oxide Nanoparticles // *Colloids Surf., A.* 2018. V. 554. P. 279.
  37. *Rudyak V.Ya., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I.* Preparation, Characterization, and Viscosity Studying the Single-Walled Carbon Nanotube Nanofluid // *J. Mol. Liq.* 2021. V. 329. № 1. P. 115517.
  38. *Schierz A., Zänker H.* Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes: Surface Oxidation, Colloidal Stability, and Uranium Sorption // *Environ. Pollut.* 2009. V. 157. P. 1088.
  39. *Chiang Y.C., Lin W.H., Chang Y.C.* The Influence of Treatment Duration on Multi-Walled Carbon Nanotubes Functionalized by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/HNO<sub>3</sub> Oxidation // *Appl. Surf. Sci.* 2011. V. 257. P. 2401.
  40. *Manzetti S., Gabriel J.-C.P.* Methods for Dispersing Carbon Nanotubes for Nanotechnology Applications: Liquid Nanocrystals, Suspensions, Polyelectrolytes, Colloids, and Organization Control // *Int. Nano Lett.* 2019. V. 9. P. 31.
  41. *Ali A.J., Tugolukov E.N.* An Experimental Study on the Influence of Functionalized Carbon Nanotubes CNT Taunit Series on the Thermal Conductivity Enhancement // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 693. P. 012001.