

УДК 62-022.532 620.3

**Механизм теплопереноса в наножидкостях:
современное состояние проблемы (обзор).
Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей**

В.И. Терехов, С.В. Калинина, В.В. Леманов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований по механизму теплопереноса в наножидкостях. Рассмотрен широкий круг проблем, связанных с технологией получения наножидкостей, экспериментальным оборудованием и особенностями измерительных методик. Представлены опытные данные по теплопроводности наножидкостей при вариации концентрации, размеров и материала наночастиц. Дан анализ результатов по вынужденной и свободной конвекции в ламинарном и турбулентном режимах течения. Представлены существующие модели физических механизмов интенсификации и подавления теплопереноса в наножидкостях. Показаны значительные отличия в данных различных исследователей, анализируются возможные причины этих расхождений.

Ключевые слова: наножидкость, теплопроводность, теплообмен, свободная и вынужденная конвекция.

ВВЕДЕНИЕ

Современные проблемы энергетики и получающие все большее распространение микро и нанотехнологии диктуют необходимость миниатюризации систем охлаждения и разработки эффективных методов управления теплообменом. Одним из перспективных способов интенсификации теплообменных процессов представляется повышение теплопроводности теплоносителя (жидкости) путем добавления в него твердых частиц с высокой теплопроводностью. Многочисленные исследования показали, однако, что использование частиц микронного размера может приводить не к интенсификации, а наоборот, к снижению теплоотдачи за счет подавления турбулентности дисперсной фазой (Pakho-mov, 2007). Кроме того, могут возникнуть такие нежелательные эффекты, как абразивный износ поверхности канала, отложение частиц на стенке и в застойных зонах, увеличение гидравлического сопротивления. В этой связи переход к нанометровым частицам оправдан и призван решить существующие проблемы.

В настоящее время изучением свойств наножидкостей активно занимаются многочисленные исследовательские группы в таких странах как США, Корея, КНР, Япония, Англия и др., а число публикаций, посвященных наножидкостям, особенно в последнее десятилетие растет экспоненциально (Choi, 2009). В частности, опубликована монография (Das, 2007) и ряд обзоров, в которых рассмотрен

Таблица

Название материала	k , Вт/м·К
Глинозем (окись алюминия, Al_2O_3)	20
CuO (окись меди)	40
SiC (карбид кремния)	120
Au (золото)	317
Cu (медь)	401
Углеродные нанотрубки	~ 3000
Вода	0,55
Масло машинное	0,145
Этиленгликоль	0,253

широкий круг вопросов — от локальных свойств наножидкостей до возможностей их практического применения (Das, 2006, Ding, 2007, Wang, Mujumdar, 2007, Yu, 2007, Choi, 2008, 2009; Wang, Wei, 2009, Chandrasekar, 2009, Rudyak, 2000 и др.).

С какими свойствами наножидкостей исследователи связывают свои надежды по интенсификации теплообмена? В первую очередь это вызвано высокой теплопроводностью наночастиц. В таблице приведены значения теплопроводности при комнатной температуре для некоторых материалов, используемых при приготовлении наножидкостей. Видно, что теплопроводность углеродных нанотрубок существенно выше, чем у металлов, и более чем на четыре порядка превышает аналогичную величину для базовой жидкости, что может привести к значительным изменениям теплофизических свойств наножидкостей и усилению теплообменных процессов.

Несмотря на большое число работ в этой области многие проблемы остаются малоизученными, а полученные результаты носят зачастую противоречивый характер. Это обусловлено, прежде всего, сложностью процессов в наножидкостях, начиная с их приготовления, протекания деструктивных процессов, особенностью экспериментальной техники и достоверностью получаемых результатов. Не меньшие трудности возникают и при создании физических моделей, описывающих гидродинамические и тепловые явления в наножидкостях. Отметим, что в силу ограниченности объема обзора этот аспект проблемы рассмотрен не столь подробно.

В настоящем обзоре основное внимание уделено анализу механизмов теплопереноса в наножидкостях с целью определения интенсифицирующего влияния добавок наночастиц при вынужденной и свободной конвекции теплоносителя для различных режимов его течения с оценкой возможности использования теплоносителей с добавками наночастиц в реальных энергоустановках.

1. СИНТЕЗ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Основу наножидкости составляют базовая жидкость и наночастицы какого-либо высокотеплопроводного материала. В качестве базовой жидкости чаще всего используют воду, этиленгликоль, машинное масло. Материалом для наночастиц служат металлы, окислы металлов, углерод (чаще всего в виде одно-, двух- или многостеночных трубок с различным отношением длины трубки к ее диаметру). Теплопроводность углеродных нанотрубок в настоящее время активно изучается, однако проблема все еще остается открытой. Причина этого частично связана со сложностью измерений, частично — с неопределенностью объекта, например, параметрами трубки. Кроме того, данные (Asaka, 2008) свидетельствуют о высокой чувствительности транспортных характеристик углеродных нанотрубок к условиям их синтеза. Значение $k = 3000$ Вт/м·К получено (Kim, 2001) для многостеночной нанотрубки диаметром 14 нм и длиной несколько микрон.

Получаемые наножидкости должны удовлетворять набору требований: они должны быть равномерными, устойчивыми к агломерации и выпадению в осадок в течение длительного времени, в них должны отсутствовать химические реакции и т. д., при этом главной проблемой, по мнению многих авторов, является агломерация.

Следует отметить, что склонность к агломерации отражает одно из важнейших свойств наночастиц — их большую поверхностную активность. Большая поверхностная активность наночастиц с одной стороны приводит к тому, что мелкие частицы не тонут (не выпадают в осадок), а с другой — склонны к образованию агломератов. Описанная особенность наночастиц существенно влияет на технологии получения наножидкостей и поддержания их в рабочем состоянии.

Существующие методы изготовления наножидкостей подразделяют на одноступенчатые и двухступенчатые.

При одноступенчатых методах наножидкость получают в течении одного технологического цикла. Положительную специфику одношаговых технологий выражает то, что наночастицы получаются, как правило, очень мелкие (2–20 нм), агломерация наночастиц минимизируется, а получаемые наножидкости характеризуются как стабильные.

Одноступенчатый метод, получивший название VEROS (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate техника), был предложен (Akoh, 1978). Он состоит в следующем: металл (материал наночастиц) испаряется электронным пучком в вакуумной камере и здесь же оседает на покрытый маслом (базовая жидкость) вращающийся диск.

Существуют разновидности данного метода, отличающиеся от него способом испарения электрода и технологией осаждения частиц в базовую жидкость. Например, (Yatsuya, 1984) модифицировал метод VEROS, заменив подвижную масляную подложку на неподвижную. В работе (Wagener, 1997) для испарения электрода использован метод магнетронного распыления. Образование наночастиц при магнетронном распылении происходит за счет бомбардировки катода ионами рабочего газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда, возбуждаемого в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях. Методом магнетронного распыления могут быть испарены материалы, имеющие высокую температуру плавления, без повреждения базовой жидкости. Предложенный метод был апробирован (Wagener, 1997) для приготовления суспензий материалов Ag и Fe для разных базовых жидкостей. Полученные ими наночастицы имели размер 2–20 нм.

В работе (Lo, 2005) для разогрева и разрушения изготовленного из меди катода использован электрический разряд, при этом и катод и анод были погружены в базовую жидкость (де-ионизованную воду с различным объемным содержанием этиленгликоля — 30, 50, 70 и 100 %). Авторы установили, что получаемые в результате разные модификации наножидкостей в основном определяются различием теплопроводности исходных базовых жидкостей; с использованием описанной методики они (Lo, 2006) изготовили Ni (никелевую) наномангнитную жидкость.

Аналогичной описанным является технология, использованная в работе (Симакин, 2004). Для испарения материала мишени авторы использовали лазерную абляцию, при этом мишень была помещена в базовую жидкость. Как и описанные выше, данная методика также непосредственно связана с развитием методов получения тонких пленок и по существу является их побочным продуктом.

Заметную нишу среди одноступенчатых занимают химические методы. В работе (Zhu, 2004) медная наножидкость получена в результате реакции восстановления $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в этиленгликоле под воздействием микроволно-

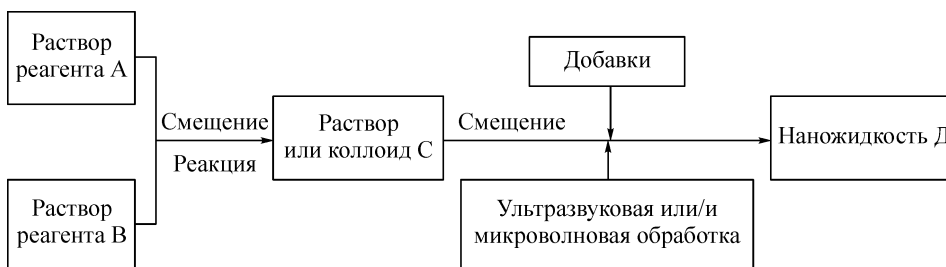


Рис. 1. Схема химического метода получения наножидкостей.

вого излучения. Результаты показали, что добавление $\text{NaNH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и наложение микроволнового поля являются двумя существенными факторами, которые влияют на скорость реакции и свойства получаемой медной наножидкости.

На рис. 1 показана общая схема химического метода, заимствованная из работы (Wang, Wei, 2009). На заключительном этапе приготовления наножидкости для улучшения ее равномерности могут добавляться химические дисперсанты, либо применяться ультразвуковая и микроволновая обработка. Авторами упомянутой работы получено 8 различных наножидкостей, отличающихся материалом и формой наночастиц, а также базовой жидкостью. Они прогнозируют большие перспективы химической технологии и возможности получения наножидкостей с заданными свойствами.

При двухступенчатых методах наночастицы сначала производятся, а затем вносятся в жидкость. По сравнению с одноступенчатыми методами, хорошо работающими для частиц из металлов, двухступенчатая техника предпочтительна для частиц из окислов из-за их меньшей склонности к агломерации. (Eastman, 1997, Lee, 1999, Wang, 1999) использовали двухступенчатую технологию для изготовления Al_2O_3 — наножидкости. В работе (Murshed, 2005) этот же метод использовался для приготовления водной суспензии наночастиц TiO_2 . Для изготовления алмазной наножидкости и исследования ее свойств (Kang, 2006) использовали базовые жидкости — этиленгликоль и воду без присадок и стабилизаторов.

Как и в химических методах, для равномерного распределения частиц по базовой жидкости и уменьшения их агломерации используются разные способы, такие как обработка ультразвуком, обработка электромагнитным излучением определенных частот, регулирование кислотности наножидкости (аксидирование), добавка в нее поверхностно активных компонентов и др. Например, (Xuan, Li, 2000) для повышения стабильности наножидкостей (трансформаторное масло–медь и вода–медь) использовали соответственно соль и октадециленовую кислоту. Эта же кислота и цетилтриметиламмоний бромистый были использованы (Murshed, 2005), чтобы гарантировать стабильность наножидкости вода– TiO_2 . Следует отметить, что указанные обработки изменяют поверхностную активность взвешенных частиц и таким образом влияют на образование кластеров. Очевидно, что при этом изменяются и базовые свойства наножидкостей.

2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Несмотря на непродолжительную историю наножидкостей, к настоящему времени накопилось достаточно данных, позволяющих говорить о их необычных свойствах. Согласно хронологии (Choi, 2009) — на раннем этапе исследований использовались оксидные наножидкости, изготовленные двухступенчатым методом. Хотя эти жидкости и показывали повышение теплопроводности, все же оно находилось в пределах, предсказанных существующими расчетными моделями, разработанными для обычных суспензий.

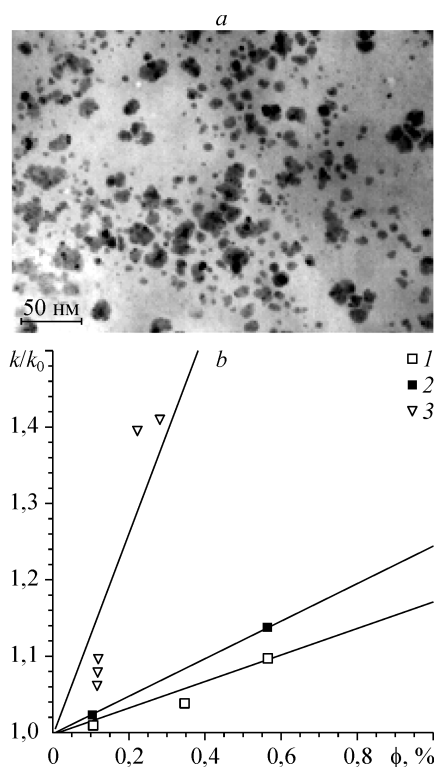
Впервые расхождение результатов расчетов и экспериментов получено и описано (Eastman, 2001) с соавторами. Ими были получены неожиданно высокие значения теплопроводности для наножидкости медь+этиленгликоль. Эта жидкость была произведена по одноступенчатой технологии, размер частиц не превышал 10 нм, а для стабильности суспензии добавлялся теогликоль оксид. Необычность полученных результатов, демонстрируемых на рис. 2 состояла не в том, что теплопроводность выросла на 40 % по сравнению с базовой жидкостью, а в том, что это увеличение было достигнуто при очень малых объемных концентрациях наночастиц, составляющих доли процента. Эти данные привлекли внимание исследователей, стимулировали экспериментальное изучение теплопроводности других, в том числе и медных наножидкостей, приготовленных по другим технологиям, на основе других базовых жидкостей (Liu, 2006, Jana, 2007, Zhang, 2006, Putnam, 2006). Так, (Liu, 2006) использовал медную наножидкость, синтезированную на основе воды методом химического восстановления без добавок поверхностно активных компонентов. Теплопроводность в этом исследовании повысилась до 23,8 % при объемной концентрации 0,1 %. Исследовавшие целый набор наножидкостей (Jana, 2007) с соавторами показали, что наножидкости на основе воды и медных наночастиц демонстрируют рост теплопроводности, существенно превышающий расчетные предсказания. В то же время (Zhang, 2006, Zhang, 2007, Putnam, 2006) не нашли аномальной интенсификации коэффициента теплопроводности.

В работе (Zhang, 2007) экспериментально исследовалась эффективная теплопроводность наножидкостей золото+толуол, окись алюминия+вода, окись титана+вода, окись меди+вода и углеродные нанотрубки+вода. Диаметры этих сферических частиц составили соответственно 1,65, 20, 40 и 33 нм; средняя длина и диаметр углеродных нанотрубок — 10^{-6} м и 150 нм. Результаты измерений показали, что эффективная теплопроводность наножидкостей не является аномально большой и с хорошей точностью может быть предсказана моделью (Hamilton, 1962) для сферических наночастиц и с помощью однопористой модели Ямада и Ота для углеродных нанотрубок (Zhang, 2007).

Одна из попыток систематизации полученных к настоящему времени экспериментальных данных предпринята (Wang, Mujumbar, 2007). С этой целью авторами проведено раздельное сопоставление теплопроводностей наножидкостей на основе углеродных нанотрубок и всех остальных материалов и геометрических параметров частиц. На рис. 3 представлены данные разных авторов по относительной теплопроводности различных наножидкостей.

Рис. 2. Структура наножидкости (а), зависимость теплопроводности наножидкости от концентрации частиц (b).

Выдержанная наножидкость (1), свежеприготовленная наножидкость (2), окислированная наножидкость (3). Данные (Eastman, 2001).



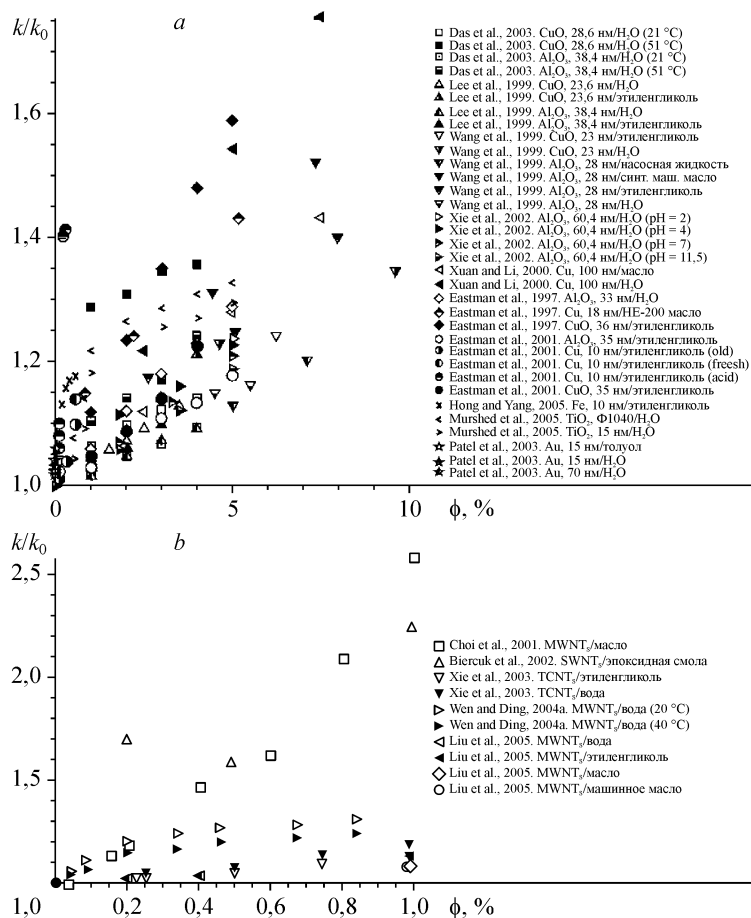


Рис. 3. Теплопроводность наножидкостей в зависимости от объемной концентрации наночастиц (а), SWNT — одностеночные углеродные нанотрубки (b), TCNT — двухстеночные, MWNT — многостеночные. Обзор (Wang, Mujumbar, 2007).

Из рис. 3, а (металлические и оксидные частицы) видно, что при повышении объемной концентрации частиц до 10 % не только медь, но и другие материалы могут приводить к большому (до 70 %) увеличению теплопроводности. Данные (Eastman, 2001) для медных частиц выделяются на этой фигуре достаточно большим повышением теплопроводности, малым размером частиц, но прежде всего тем, что лежат обособленно, располагаясь в области очень малых концентраций.

Такие же необычные свойства обнаружены для некоторых наножидкостей на основе углеродных нанотрубок. На рис. 3, b представлены данные авторов (Choi, Zhang, 2001, Biercuk, 2002, Xie, Lee, 2003, Wen, Ding, 2004, a, Liu, 2005), при этом повышение теплопроводности оказалось максимальным, до 2,5 раз (данные Choi, Zhang, 2001) для наножидкости — многостеночные углеродные трубки+масло. Как отмечается в обзоре (Choi, 2009), по-видимому, именно такие необычные свойства наножидкостей позволяют говорить о них как о новом типе жидкостей и вводить для них отдельный термин — наножидкость, — отличая от обычных суспензий. Из данных рис. 3 следует, что "истинные" наножидкости могут быть получены с помощью частиц разной формы и материалов.

В обзоре (Ding, Chen, 2007) результаты измерений разных авторов классифицированы в соответствии с материалом наночастиц. Эти данные показаны на рис. 4. Авторы используют собственные (Wen, 2004, a, 2004, b, 2005, a, 2005, b, 2006, Ding,

Рис. 4. Классификация наножидкостей по материалу частиц. CNT — многостеночные углеродные нанотрубки (обзор Ding, 2007).

Alias, 2006, He, 2007), данные, полученные при комнатной температуре, а также других авторов (Lee, 1999, Eastman, 2001, Choi, Zhang, 2001, Xie, 2002, a, b, Biercuk, 2002, Das, Putra, 2003, a, Patel, 2003, Kumar, 2004, Assael, 2004, Zhang, 2007). Базовыми жидкостями служили вода, этиленгликоль, нефть и композитные материалы на основе полимеров. Также разными были материалы наночастиц. Они включали многостеночные углеродные нанотрубки, золото, медь, карбид кремния, окиси алюминия, титана, меди. Авторы (Ding, Chen, 2007) отмечают, что размер частиц на рис. 4 не учтен. Основная причина такого подхода состоит в том, что все публикации дают, как правило, только первичный размер наночастиц. При этом хорошо известно, что частицы склонны к агломерации и этот процесс влияет на тепловую проводимость жидкости. Несмотря на существенный разброс данных рис. 4, из них следует, что присутствие наночастиц в жидкостях в значительной степени увеличивает теплопроводность, при этом масштаб повышения теплопроводности зависит от материала наночастиц и их объемной доли.

Анализ рис. 4 приводит также к выводу, что экспериментальные данные могут быть приблизительно поделены на две группы, разделенные демаркационной полосой. Данные с левой стороны от полосы соответствуют наножидкостям с металлическими наночастицами и углеродными нанотрубками, в то время как данные на правой стороне соответствуют наночастицам из окислов металлов и карбида кремния (SiC). Ширина полосы представляет пересечение между двумя группами. В целом, несмотря на некоторую условность деления данных, результаты на рис. 4 показывают, что наножидкости, изготовленные с использованием более высокотеплопроводных материалов, дают более высокотеплопроводную наножидкость. Такой вывод можно сделать, сравнивая данные о теплопроводности материалов (см. табл. 1) и об их взаимном расположении на рис. 4.

Наиболее подробный анализ выявленных на сегодня необычных свойств наножидкостей дан в обзоре (Choi, 2009). Кроме сильного роста теплопроводности при низкой концентрации наночастиц автор отмечает также другие важные свойства наножидкостей, отличающие ее от обычных суспензий. К ним, в частности, относятся нелинейный характер зависимости теплопроводности от концентрации наночастиц, а также ее сильная зависимость от температуры и размера частиц. Впервые нелинейная связь теплопроводности и концентрации частиц была обнаружена (Choi, 2001) при исследовании наножидкости углеродные нанотрубки+масло (рис. 5). На сегодняшний день известно, что нелинейное поведение наножидкостей не ограничено углеродными нанотрубками. Наножидкости, содержащие сферические наночастицы, также могут демонстрировать сильное нелинейное поведение (Murshed, 2005, Hong, 2005, Chopkar, 2006) с соавторами.

Наножидкости, содержащие сферические наночастицы, также могут демонстрировать сильное нелинейное поведение (Murshed, 2005, Hong, 2005, Chopkar, 2006) с соавторами.

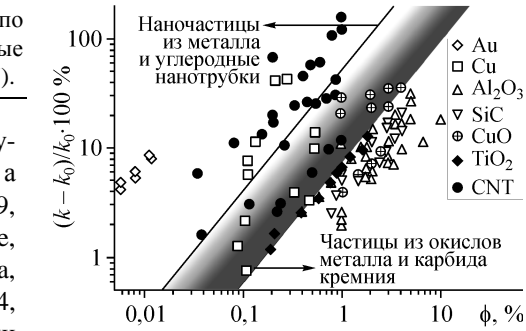
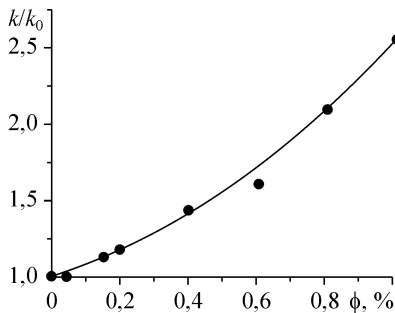


Рис. 5. Нелинейная зависимость теплопроводности наножидкости от концентрации частиц. Данные (Choi, 2001).

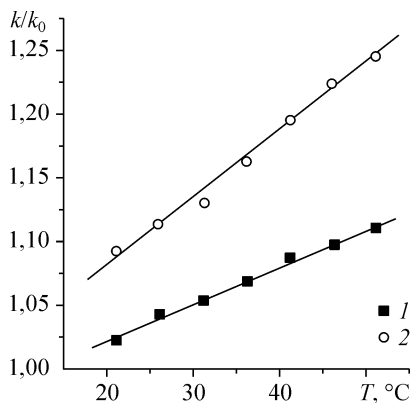


Рис. 6. Зависимость теплопроводности наножидкости от температуры. Данные (Das, 2003). Al_2O_3 , $\phi = 1$ (1), 4 (2) %.

Сильная зависимость теплопроводности наножидкости от температуры и размера частиц обнаружена в работах (Das, Putra, 2003, Li, 2006, Chopkar, 2006 и др.). Согласно (Das, Putra, 2003) (рис. 6) существенное изменение теплопроводности Al_2O_3 или CuO наножидкостей наблюдается в малом температурном диапазоне от 20 до 50 градусов. Еще более сильное влияние температуры, чем в работе (Das, Putra, 2003) исследовали зависимость теплопроводности наножидкости из $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$ от размера частиц (Li, 2006, Chopkar, 2006).

(Chon, 2005, a, b, Hong, 2006, Kim, Choi, 2007) также показали зависимость теплопроводности от размера. (Choi, 2009) отмечает, что эффекты влияния температуры и размера частиц настолько выражены, что могут быть приняты в качестве критериев для классификации суспензий в качестве наножидкости.

Следует отметить, что мнения разных авторов о степени влияния температуры на теплопроводность наножидкостей в общем случае не совпадают. Например, (Ding, Chen, 2007), проанализировав экспериментальные зависимости теплопроводности от температуры для наножидкостей из трех типов металлооксидных наночастиц, делает вывод, что они являются слабыми, а не соответствующие этому утверждению данные (Das, Putra, 2003) для наножидкости $\text{CuO}+\text{H}_2\text{O}$ являются не специфической особенностью наножидкостей, а случайным исключением.

Таким образом, результаты одних опытов показывают аномальное поведение теплопроводности, других — укладываются в представления об обычных суспензиях. Такое расхождение данных разных авторов свидетельствует о большом разнообразии факторов, влияющих на теплопроводность наножидкости, и о необходимости дальнейшего накопления опытных данных и их систематизации.

3. МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В НАНОЖИДКОСТЯХ

Известно, что в жидкостях и твердых телах различают два основных механизма теплопроводности: свободными электронами (электронная теплопроводность) и атомными колебаниями (фононная или решеточная теплопроводность). Фононная теплопроводность преобладает в диэлектриках, к которым относится большинство жидкостей, в том числе чистая вода, а электронная — в металлах.

Для объяснения причин увеличения теплопроводности в наножидкостях, содержащих частицы высокотеплопроводных материалов, к настоящему времени исследователями анализируется несколько основных механизмов (рис. 7), в их

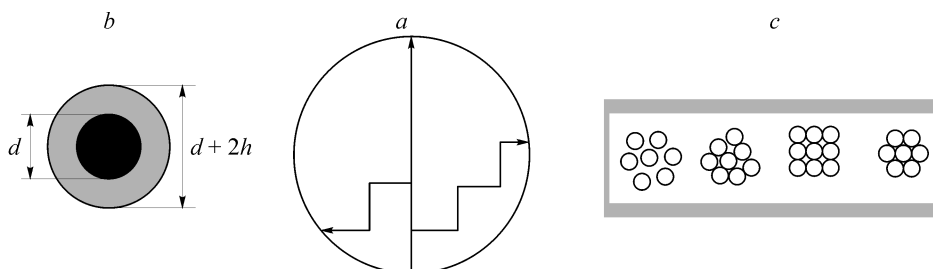


Рис. 7. Механизмы интенсификации переноса тепла в наножидкостях: образование переходного молекулярного слоя на поверхности наночастицы (a), баллистический механизм переноса тепла (b), раздувание и образование новых кластеров наночастиц (c).

числе броуновское движение наночастиц, образование высокотеплопроводного жидкого слоя (с толщиной — молекулярного уровня) на границе раздела жидкость—частица (см. рис. 7, *a*), баллистический перенос тепловой энергии внутри индивидуальной наночастицы и между наночастицами, который происходит при их контакте (см. рис. 7, *b*), а также влияние кластеризации наночастиц (см. рис. 7, *c*) (Kebinski, 2002, Eastman, 2004, Wang, 2003, Yu, 2003, Patel, 2003, Kumar, 2004, Shenogin, 2004, a, Shenogin, 2004, b, Prasher, 2006 с соавторами).

Вопрос о роли броуновского движения в теплопроводности наножидкости дебатировался достаточно давно, но остается нерешенным до настоящего времени. Так, (Wang, 1999) с соавторами утверждают, что теплопроводность наножидкостей должна зависеть от микроскопического движения (броуновского движения и сил взаимодействия между частицами) и структуры наночастиц; (Li, 2007) делают вывод о ключевой роли броуновского движения в теплопроводности наножидкости, а по оценкам (Kebinski, 2002, Evans, 2006) эта роль пренебрежимо мала. Как показывает анализ, такое различие в выводах разных авторов в значительной степени связано с двойственной природой механизма, посредством которого броуновское движение влияет на перенос тепла.

Броуновское движение наночастиц может вносить вклад в теплопроводность двумя путями: прямо — в результате диффузии наночастиц и косвенно — в результате интенсификации микроконвекции жидкости, окружающей индивидуальные наночастицы. В работе (Kebinski, 2002) сделаны теоретические оценки прямого вклада броуновского движения наночастиц в теплопроводность наножидкости. Показано, что временной масштаб этого механизма переноса тепла (определенный на основе формулы Стокса–Эйнштейна для коэффициента диффузии) даже для очень мелких наночастиц (10 нм) более чем на 2 порядка больше по сравнению с характерным временем переноса тепла теплопроводностью в базовой жидкости. Основываясь на этом, авторы делают вывод, что прямой вклад броуновского движения в общий перенос тепла наножидкостью пренебрежимо мал.

С этим заключением согласны (Ding, 2007) с соавторами. По их мнению, экспериментальным доказательством малой роли диффузии наночастиц в переносе тепла может служить слабая зависимость теплопроводности наножидкости от вязкости базовой среды и от температуры. Для подтверждения первого положения авторы приводят данные по теплопроводности для алюминиевых наножидкостей, сделанных с использованием трех базовых сред с сильно различающейся вязкостью (рис. 8). Видно, что данные расслаиваются, но это расслоение не коррелирует с вязкостью базовой жидкости. Что касается второго положения о слабой зависимости теплопроводности наножидкости от температуры, то, как было показано выше, оно не является бесспорным.

В отличие от прямого, косвенное влияние броуновского движения на теплопроводность наножидкости может быть значительным. Такой вывод сделан (Li, 2007). Согласно принятой авторами теоретической модели, опирающейся на визуализацию течения, каждая наночастица в результате взаимодействия с базовой средой наряду с обычным броуновским движением совершает локальные

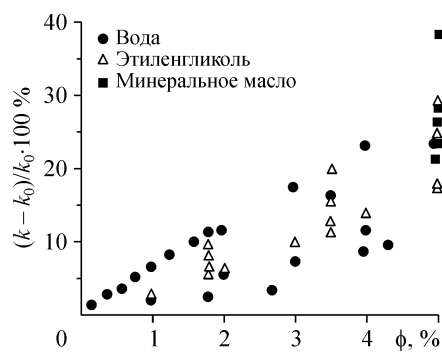


Рис. 8. Влияние свойств базовой жидкости на интенсификацию переноса тепла в алюминиевых наножидкостях (обзор). По данным работ (Lee, 1999, Eastman, 2001, Xie, 2002 a, Das, Putra, 2003 b, Wen, Ding, 2004 b).

периодические движения. Результаты работы указывают, что микроконвекция и смешение, стимулированные колебанием наночастиц, могут значительно влиять на макроскопические транспортные свойства наножидкостей.

Многие исследователи использовали концепцию разделительного междуфазного слоя на границе жидкость–твердое тело, чтобы объяснить аномальное повышение тепловой проводимости в наножидкостях. Находящиеся вблизи границы твердой фазы жидкие молекулы могут быть в значительной степени более упорядочены по сравнению с теми, которые находятся в объеме. Упорядоченная структура может являться механизмом повышения тепловой проводимости (Kebinski, 2002), в частности, из-за изменения эффективного объема наночастиц (эффективной объемной концентрации наночастиц). К настоящему времени влияние междуфазного слоя на теплопроводность наножидкости учтена в целом ряде макроскопических моделей (см., например, Yu, Choi, 2003, Wang, 2003), причем выводы этих авторов иногда прямо противоположны.

Модифицировать модель Максвелла, учитывающую промежуточный молекулярный слой вокруг частиц, предложили (Yu и Choi, 2003), они пришли к выводу, что наличие даже очень тонких слоев нанометровой толщины может заметно увеличивать эффективную объемную концентрацию твердой фракции и величину теплопроводности наножидкости, особенно когда диаметр частиц < 10 нм. Предложенная авторами модель предсказывает до восьмикратного увеличения теплопроводности наножидкости по сравнению с данными, полученными на основе модели Максвелла без учета промежуточного слоя. В то же время противоположный результат получен (Xue, 2004). Согласно их данным, увеличение тепловой проводимости суспензий наночастиц не удастся объяснить увеличением теплопроводности промежуточного слоя.

Существует также концепция (Kebinski, 2002), согласно которой граница раздела жидкость–наночастица является одним из факторов, который скорее уменьшает, чем увеличивает эффективную теплопроводность в результате так называемого контактного сопротивления Капицы (Shenogin, 2004, a, Shenogin, 2004, b, Nan, 2003, Gao, 2007). Явление состоит в том, что при передаче теплоты на границе раздела любых разнородных сред, из которых, по крайней мере, одна — диэлектрик, возникает разность температур (открыто Капицей в 1941 г.). Влияние сопротивления переходного слоя на полную эффективную теплопроводность наножидкости растет с уменьшением размера частиц (Kebinski, 2005, Prasher, 2005, Putnam, 2006, Gao, 2007). Сделанные (Evans, 2008) оценки показали, что тепловое сопротивление переходного слоя находится в пределах $10 \div 100$ мВт/м²·К и для большинства наножидкостей его можно считать пренебрежимо малым. В то же время в общем случае его необходимо учитывать.

Следующий из представленных на рис. 7 механизмов переноса тепловой энергии получил название баллистического. Его специфику составляют отсутствие бокового рассеяния теплового потока и большая скорость его распространения (Зольников, 1999, Елецкий, 2009). В работе (Зольников, 1999) теоретически показано, что при определенных условиях (например, для никеля при температурах до 300 К) в кристаллических средах возможно распространение импульса тепла на макроскопические расстояния с очень большой скоростью, порядка звуковой (до нескольких тысяч метров в секунду). Носителями теплоты при этом выступают солитонобразные импульсы фононов (нелинейные тепловые волны), не испытывающие при своем распространении сколько-нибудь заметного ослабления. Слабое затухание в свою очередь означает, что теплопроводность, реализуемая указанным механизмом, — высокая ($q = \lambda \cdot Dt/dx$). Последнее обуславливает тот интерес, который вызывает у исследователей этот механизм.

Ниже приведены данные разных авторов, касающиеся возможности баллистического механизма переноса тепла в углеродных нанотрубках. Особый интерес к углеродным нанотрубкам вызван тем, что именно они дают наибольшее повышение теплопроводности при добавлении их в теплоноситель. Можно также предположить, что близкая к мономерной форма трубчатых наночастиц будет способствовать баллистическому механизму.

Согласно проведенным в Пенсильванском университете исследованиям, перенос тепла в углеродных нанотрубках осуществляется фононами. J.E. Fischer и A.T. Johnson, 1999 обнаружили, что фононы распространяются строго вдоль нанотрубок со скоростью 10 км/с и очень эффективно переносят тепло. Кроме того, тепло хорошо передается даже вдоль многих, соединенных между собой, нанотрубок.

Иная ситуация складывается, если трубки спутаны в клубок. (None, 1999) провел измерения теплопроводности образцов размером $5 \cdot 2 \cdot 2 \text{ мм}^3$, максимально плотно заполненных одностеночными углеродными нанотрубками в виде спутанных клубков размером порядка микрона в диапазоне температур от 8 до 350 К. При комнатной температуре значение теплопроводности составило всего лишь 35 Вт/м·К, что практически на два порядка меньше, чем у единичной нанотрубки (Kim, 2001).

Объектом исследований (Asaka, 2008) явились одностеночные углеродные нанотрубки диаметром 1,66 нм. Авторы подчеркивают, что имеющиеся в настоящее время данные о коэффициентах теплопроводности углеродных нанотрубок характеризуются разбросом до двух порядков величины. Разброс с одной стороны обусловлен неконтролируемым влиянием структурных дефектов нанотрубок на их транспортные характеристики, а с другой — методическими трудностями измерения коэффициентов переноса объектов, имеющих нанометровые размеры. Для локального импульсного нагрева нанотрубки использовали излучение лазера с $\lambda = 532 \text{ нм}$, фокусируемое с помощью специальной оптической системы в пятно диаметром 0,36 мкм. Результаты измерений указывают на несущественную роль баллистического механизма переноса тепла в исследуемых нанотрубках. Это следует из наличия значительного температурного градиента вдоль трубки, который возможен только при преобладающем влиянии диффузионного механизма переноса тепла.

Обширный анализ транспортных свойств углеродных нанотрубок, в том числе теплопроводности, дан в обзоре (Елецкий, 2009). Не ставя под сомнение возможность баллистического переноса тепла в углеродных нанотрубках, автор указывает общее условие, необходимое для его реализации: длина свободного пробега фонона относительно рассеяния на других фононах или неоднородностях материала должна быть больше, чем длина нанотрубки. Соответственно, в одних трубках этот механизм будет преобладающим, в других — нет.

Вопрос о возможности баллистического механизма переноса тепла в наножидкостях, в том числе в наножидкостях на основе углеродных нанотрубок, где частицы составляют лишь малую долю, еще более сложен и в настоящее время остается открытым. Согласно (Kebblinski, 2002), для реализации баллистического механизма в наножидкости кроме требования фононного баллистического механизма переноса тепла в частицах необходимо, чтобы он сохранялся и в базовой жидкости. Последнее возможно, если расстояние между частицами будет очень малым, порядка длины свободного пробега фонона в жидкости.

На рис. 9 показаны расчетные зависимости расстояния между частицами от их размера и объемной концентрации (Kebblinski, 2002). Можно видеть, что в случае мелких частиц даже при небольшой концентрации расстояние между ними может быть очень малым. Более того, из-за броуновского дрожания частиц эффективное расстояние между ними может быть еще меньшим. Таким образом, есть

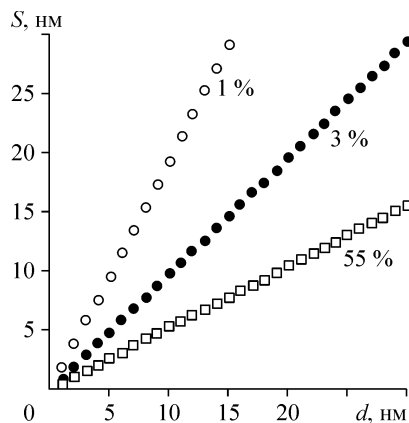


Рис. 9. Зависимость среднего расстояния между частицами “S” от их диаметра и концентрации.

основания предполагать, что причиной большой теплопроводности наножидкостей являются нелинейные тепловые волны.

Волновой механизм переноса тепла предложен также в работе (Wang, Wei, 2009). По мнению авторов, возникающие в наножидкостях тепловые волны могут резонировать и сильно изменять величину теплопроводности.

Последний представленный на рис. 7 механизм связан с раздуванием наночастиц

или их переструктурированием при попадании в базовую жидкость. Результатом этого является неправильное определение эффективного объема частиц и, соответственно, их эффективной концентрации (Prasher, Evans, 2006). Важность учета данного механизма при расчете истинной объемной концентрации частиц подтверждена экспериментальными результатами и теоретическими исследованиями наножидкости этиленгликоль+титан, выполненными (Ding, 2007). Этими авторами показано, что размер наночастиц в наножидкостях приблизительно в 3,5 раза больше размера первичных частиц. По мнению (Kebinski, 2008), чтобы объяснить весь имеющийся экспериментальный материал по теплопроводности наножидкостей достаточно учесть только кластеризацию частиц, без привлечения каких-либо других механизмов.

Следует отметить особенность, которая всегда сопутствует переносу тепла в наножидкостях. Она состоит в том, что при наличии градиента температуры в многокомпонентной среде возникает термодиффузия — эффект Соре: перенос компонентов газовых смесей или растворов под влиянием градиента температуры. Если разность температур поддерживается постоянной, то вследствие термодиффузии в объеме смеси возникает градиент концентрации, что вызывает также и обычную диффузию. В стационарных условиях термодиффузия уравнивается обычной диффузией и в объеме возникает разность концентраций, которая может быть использована для разделения компонентов смеси. В свою очередь возникающие неоднородности концентраций могут влиять на эффективную теплопроводность.

ВЫВОДЫ

1. Добавление наночастиц в жидкость в значительной степени увеличивает ее теплопроводность, при этом масштаб повышения зависит от материала наночастиц, их объемной доли, а также многих других факторов.

2. Каков физический механизм теплопроводности в наножидкости, является ли он единственным или одновременно действуют несколько, что происходит при изменении параметров наножидкости — ее состава, свойств наночастиц, свойств базовой жидкости и т. д., — ответы на эти вопросы до настоящего времени остаются открытыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Елецкий А.В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок // УФН. 2009. Т. 179, No. 3. С. 225–242.
 Зольников К.П., Кадыров Р.И., Наумов И.И., Псахье С.Г., Руденский Г.Е., Кузнец В.М. О возможности нелинейного распространения тепловых импульсов в твердых телах при дебаевских температурах // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 6. С. 55–59.

- Симакин А.В., Воронов В.В., Шафеев Г.А.** Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях // Тр. Ин-та общей физики им А.М. Прохорова. РАН. 2004. Т. 60. С. 83–107.
- Akoh H., Tsukasaki Y., Yatsuya S., Tasaki A.** Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate // *J. of Crystal Growth*. 1978. Vol. 45. P. 495–500.
- Asaka K., Nakahara H., Saito Y.** Nanowelding of a multiwalled carbon nanotube to metal surface and its electron field emission properties // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 023114.
- Assael M.J., Chen C.F., Metaxa I. and Wakeham W.A.** Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water // *Inter. J. of Thermophysics*. 2004. Vol. 25. P. 971–985.
- Biercuk M., Llaguno M., Radosavljevic M., Hyun J., Johnson A., Fischer J.** Carbon nanotube composites for thermal management // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80, No. 15. P. 2767–2769.
- Chandrasekar M., Suresh S.** A Review on the mechanisms of heat transfer in nanofluids // *Heat Transfer Engng.* 2009. Vol. 30, No. 14. P. 1136–1150.
- Choi S.U.S.** Nanofluids: A new field of scientific research and innovative applications // *Heat Transfer Engng.* 2008. Vol. 29, No. 5. P. 429–431.
- Choi S.U.S.** Nanofluids: from vision to reality through research // *J. of Heat Transfer*. 2009. Vol. 131. P. 033106-1+033106-9.
- Choi S.U.S., Zhang Z.G., Yu W., Lockwood F.E., Grulke E.A.** Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 79. P. 2252–2254.
- Chon C.H., Kihm K.D.** Thermal conductivity enhancement of nanofluids by brownian motion // *ASME J. Heat Transfer*. 2005,b. Vol. 127. P. 810.
- Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S.** Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (a₂ o₃) thermal conductivity enhancement. // *Appl. Phys. Lett.* 2005,a. Vol. 87. P. 153107.
- Chopkar M., Das P.K., Manna I.** Synthesis and Characterization of Nanofluid for Advanced Heat Transfer Applications // *Scr. Mater.* 2006. Vol. 55. P. 549–552.
- Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.** Heat transfer in nanofluids. A Review. // *Heat Transfer Engng.* 2006. Vol. 20, No. 10. P. 3–19.
- Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.** *Nanofluids Science and Technology*. Wiley-Interscience, New Jersey. 2007. 397 p.
- Das S.K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W.** Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids // *J. of Heat Transfer*. 2003. Vol. 125. P. 567–574.
- Ding Y.L., Alias H., Wen D.S., Williams R.A.** Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids) // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 240–250.
- Ding Y.L., Chen H., Wang L., Yang C-Y, He Y., Yang W., Lee W.P., Zhang L. and Huo R.** Heat Transfer Intensification Using Nanofluids // *Powder and Particle*. 2007. No. 25. P. 23–36.
- Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Thompson L.J., Lee S.** Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids // *Proc. Mater. Res. Soc. Symposium. Materials Res. Soc., Pittsburgh, PA. USA. Boston. MA. USA.* 1997. Vol. 457. P. 3–11.
- Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thomson L.J.** Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 78. P. 718–720.
- Eastman J.A., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Keblinski P.** Thermal transport in nanofluids // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2004. Vol. 34. P. 219–246.
- Evans W., Fish J., Keblinski P.** Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluids thermal conductivity // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 093116.
- Evans W., Prasher R., Fish J., Meakin P., Phelan P.** Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids, // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 1431–1438.
- Fischer J.E., Johnson A.T.** Electronic properties of carbon nanotubes // *Current Opinion in Solid State and Material Sci.* 1999. Is. 1. P.28–33.
- Gao L., Zhou X., Ding Y.L.** Effective thermal and electrical conductivity of carbon nanotube composites // *Chem. Phys. Lett.* 2007. Vol. 434. P. 297–300.
- Hamilton R.L., Crosser O.K.** Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. // *I & EC Fundamentals*. 1962. Vol. 1, No. 3. P. 187–191.
- He Y.R., Jin Y., Chen H.S., Ding Y.L., Cang D.Q., Lu H.L.** Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. P. 2272–2281.
- Hone J., Whitney M., Pisconi C., Zett A.** Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes // *Phys. Rev. B* 25. 1999. P. R2514–R2516.
- Hong K.S., Hong T.K., Yang H.S.** Thermal Conductivity of Fe Nanofluids Depending on Cluster Size of Nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 031901.
- Hong T.-K., Yang H.-S., Choi C.J.** Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids // *J. of Appl. Phys.* 2005. Vol. 97, No. 6. P. 1–4.

- Jana S., Salehi-Khojin A., Zhong W.-H.** Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives // *Thermochim. Acta*. 2007. Vol. 462, No. 1-2. P. 45–55.
- Kang H.U., Kim S.H.** Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume // *Experimental Heat Transfer*. 2006. Vol. 19. P. 181–191.
- Keblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A.** Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. P. 855–863.
- Keblinski P., Eastman J.A., Cahill D.G.** Nanofluids for thermal transport // *Materials Today*. 2005. June Issue. P. 36–44.
- Keblinski P., Prasher R., Eapen J.** Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over? // *J. of Nanoparticle Research*. 2008. Vol. 10, No. 7. P. 1089–1097.
- Kim P., Shi L., Majumdar A., McEuen P.L.** // *Phys.Rev.Lett*. 2001. Vol. 87. P. 215502.
- Kim S.H., Choi S.R., Kim D.** Thermal conductivity of metal — oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation // *ASME J. Heat Transfer*. 2007. Vol. 129. P. 298–307.
- Kumar D.H., Patel H.E., Kumar V.R.R., Sundararajan T., Pradeep T., Das S.K.** Model for heat conduction in nanofluids // *Physical Review Letter*. 2004. Vol. 93. P. 144301.
- Lee S., Choi S., Li S., Eastman J.** Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles // *J. of Heat Transfer*. 1999. Vol. 121. P. 280–289.
- Li C.H., Peterson G.P.** Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids) // *J. of Appl. Phys*. 2006. Vol. 99. P. 084314.
- Li C.H., Peterson G.P.** Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. P. 4668–4677.
- Liu M.-S., Lin M. Ching-Cheng, Huang I.T., Wang C.-C.** Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids // *Inter. Comm. in Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 32, No. 9. P. 1202–1210.
- Liu M.-S., Lin M. Ching-Cheng, Tsai C.Y., Wang C.-C.** Enhance of thermal conductivity with cu for nanofluids using chemical reduction method // *Inter. J. Heat Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 3028–3033.
- Lo C.-H., Tsung T.-T., Chen L.-C.** Ni nano-magnetic fluid prepared by submerged arc nanosynthesis system (sans) // *JSME Inter. J., Series B: Fluids and Thermal Engineering*. 2006. Vol. 48, No. 4. P. 750–755.
- Lo C.-H., Tsung T.-T., Chen L.-C.** Shape-controlled synthesis of Cu based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS) // *J. of Crystal Growth*. 2005. Vol. 277, No. 1-4. P. 636–642.
- Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.** Enhanced thermal conductivity of TiO₂ — water based nanofluids // *Inter. J. of Thermal Sciences*. 2005. Vol. 44, No. 4. P. 367–373.
- Nan C.W., Shi Z., Lin Y.** A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites // *Chem. Phys. Lett*. 2003. Vol. 375. P. 666–669.
- Pakhomov M.A., Protasov M.V., Terekhov V.I., Varaksin A.Yu.** Experimental and numerical investigation of downward gas-dispersed turbulent pipe flow // *Inter. J. Heat Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. P. 2107–2116.
- Patel H.E., Das S.K., Sundararajan T., Sreekumaran N.A., George B. P., Pradeep T.** Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects // *Appl. Phys. Lett*. 2003. Vol. 83. P. 2931–2933.
- Prasher R., Bhattacharya P., Phelan P.E.** Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids) // *Phys. Rev. Lett*. 2005. Vol. 94. P. 025901.
- Prasher R., Evans W., Meakin P., Fish J., Phelan P., Keblinski P.** Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids // *Appl. Phys. Lett*. 2006. Vol. 89. P. 143119.
- Putnam P.A., Cahill D.G., Braun P.V., Ge Z., Shimmin R.G.** Thermal conductivity of nanoparticle suspensions // *J. of Appl. Phys*. 2006. Vol. 99. P. 084308-1–6.
- Rudiyak V.Ya., Belkin A.A., Harlamov G.V.** Molecular dynamics simulation of nanoparticles diffusion in dense gases and liquids // *J. Aeros. Sci*. 2000. Vol. 31, Suppl. 1. P. S432–S433.
- Shenogin S., Bodapati A., Xue L., Ozisik R., Keblinski P.** Effect of chemical functionalization on thermal transport of carbon nanotube composites // *Appl. Phys. Lett*. 2004,a. Vol. 85. P. 2229–2231.
- Shenogin S., Xue L.P., Ozisik R., Keblinski P., Cahill D.G.** Role of thermal boundary resistance on the heat flow in carbon nanotube composites // *J. of Appl. Phys*. 2004,b. Vol. 95. P. 8136–8144.
- Wagener M., Murty B.S., Gunther B.** Preparation of metal nanosuspensions by high-pressure DC-sputtering on running liquids / S. Komarnenl, J.C. Parker, H.J. Wollenberger (Eds.) // *Nanocrystalline and Nanocomposite Materials II*, vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA. 1997. P. 149–154.
- Wang B.-X., Zhou L.-P., X.-F. Peng X.-F.** A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles // *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. P. 2665–2672.
- Wang L., Wei X.** Nanofluids: synthesis, heat conduction, and extension // *J. of Heat Transfer*. 2009. Vol. 131. P. 033102-1+033102-7.
- Wang X., Xu X., Choi S.U.S.** Thermal conductivity of nanoparticle – fluid mixture // *J. of Thermophysics and Heat Transfer*. 1999. Vol. 13, No. 4. P. 474–480.
- Wang X-Q, Mujumbar A.S.** Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: a Review // *Inter. J. of Thermal Sciences*. 2007. Vol. 46. P. 1–19.

- Wen D.S., Ding Y.L.** Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids) // J. of Thermophysics and Heat Transfer. 2004,a. Vol. 18, No. 4. P. 481–485.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Experiment investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 2004,b. Vol. 47. P. 5181–5188.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -Alumina nanofluids // J. of Nanoparticle Research. 2005,a. No. 7. P. 265–274.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications // Inter. J. of Heat and Fluid Flow. 2005,b. Vol. 26. P. 855–864.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Natural convective heat transfer of suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) // Transactions of IEEE on Nanotechnology. 2006. No. 5. P. 220–227.
- Xie H., Lee H., Youn W., M. Choi M.** Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities // J. of Appl. Phys. 2003. Vol. 94, No. 8. P. 4967–4971.
- Xie H., Wang J., Xi T., Liu Y., Ai F., Wu Q.** Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles // J. of Applied Physics. 2002,a. Vol. 91, No. 7. P. 4568–4572.
- Xie H., Wang J., Xi T., Liu Y.** Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles // Inter. J. of Thermophysics. 2002,b. Vol. 23. P. 571–580.
- Xuan Y., Li Q.** Heat transfer enhancement of nanofluids // Inter. J. of Heat and Fluid Transfer. 2000. Vol. 21. P. 58–64.
- Xue L., Keblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A.** Effect of liquid layering at the liquid—solid interface on thermal transport // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, No. 19-20. P. 4277–4284.
- Yatsuya S., Tsukasaki Y., Yamauchi K., Mihama K.** Ultrafine particles produced by Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate (VEROS) and the modified method. // J. of Crystal Growth. 1984. Vol. 70. P. 533–535.
- Yu W., Choi S.U.S.** The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model // J. of Nanoparticle Research. 2003. No. 5. P. 167–171.
- Yu W., France D.M., Choi S.U.S., Routbort J.L.** Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other application // Argonne National Laboratory, ANL/ESD/07-9. 2007. 78 p.
- Zhang, X., Gu, H., Fujii, M.** Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. No. 4. P. 044325.
- Zhang, X., Gu, H., Fujii, M.** Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles // Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. Vol. 31, No. 6. P. 593–599.
- Zhu H., Lin Y., Yin Y.** A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids // J. of Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 227. P. 100–103.

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2009 г.