

Представлені результати аналізу впливу основних факторів на теплопровідність нанофлюїдів і методику їх підготовки до досліджень, розмір і форму вихідних наночастинок, їх концентрацію, температуру, тип і властивості базових рідин, методику проведення експерименту. Наведено експериментальні дані про теплопровідність модельної системи «ізопропіловий спирт – наночастинок Al_2O_3 », їх обробка та порівняння результатів вимірювань з розрахунком за класичною моделлю Максвелла і її модифікаціями

Ключові слова: нанофлюїди, наночастинки, теплопровідність, експеримент, моделі, розрахунок, ізопропіловий спирт, Al_2O_3 , сурфактанти

Представлены результаты анализа влияния основных факторов на теплопроводность нанофлюидов, включая методику их подготовки к исследованиям, размер и форму исходных наночастиц, их концентрацию, температуру, тип и свойства базовых жидкостей, методику проведения эксперимента. Приведены экспериментальные данные о теплопроводности модельной системы «изопропиловый спирт – наночастицы Al_2O_3 », их обработка и сравнение результатов измерений с расчётом по классической модели Максвелла и ее модификациям

Ключевые слова: нанофлюиды, наночастицы, теплопроводность, эксперимент, модели, расчёт, изопропиловый спирт, Al_2O_3 , сурфактанты

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛО- ПРОВОДНОСТЬ НАНОФЛЮИДОВ

Н. А. Шимчук

Аспирант, младший научный сотрудник*

E-mail: nikola_collizzey@ukr.net

В. З. Геллер

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: vladimirgeller11@gmail.com

*Кафедра теплофизики и
прикладной экологии

Одесская национальная академия

пищевых технологий

ул. Канатная, 112,

г. Одесса, Украина, 65039

1. Введение

Результаты исследований свойств нанофлюидов (жидкостей с добавкой частиц размером от 10 до 100 нм), опубликованные в последние годы, показывают возможность существенного целенаправленного изменения их теплофизических и теплообменных характеристик по сравнению с традиционными рабочими веществами холодильных систем и систем кондиционирования воздуха. В ряде работ получено значительное увеличение теплопроводности (λ) не только для нанофлюидов с наночастицами, обладающими высокой теплопроводностью (углеродные нанотрубки, наночастицы высокотеплопроводных металлов, как например, золото или медь, но и для нанофлюидов с наночастицами окислов металлов). Для объяснения причин увеличения теплопроводности в наножидкостях к настоящему времени анализируется несколько основных механизмов: броуновское движение наночастиц, образование высокотеплопроводного жидкого слоя (с толщиной молекулярного уровня) на границе раздела жидкость-наночастица, баллистический перенос тепловой энергии внутри индивидуальной наночастицы и между наночастицами, который происходит при их контакте, а также влияние кластеризации наночастиц. В ряде исследований отмечено значительный рост коэффициентов теплоотдачи при различных режимах течения в каналах различной формы и при фазовых переходах.

Возможность улучшения энергетических характеристик холодильных систем за счёт этого эффекта в

настоящее время изучается. Например, в ряде работ показано, что наночастицы окислов металлов могут быть использованы в качестве добавки для повышения растворимости минерального масла с HFC-хладонами, при этом улучшается возврат масла в компрессор и энергетические характеристики холодильной системы (COP увеличивается до 26 %).

Большинство публикаций по свойствам нанофлюидов посвящено исследованию их теплопроводности. Обзор и краткий анализ этих исследований, приведенный в работах [1, 2], показывает, что результаты измерений теплопроводности существенно расходятся между собой, при этом причины этих расхождений остаются неизученными. Очевидно, необходимо проанализировать влияние основных факторов на точность измерения теплопроводности нанофлюидов и на основе этого анализа разработать методику исследования теплопроводности и получить достоверные данные о теплопроводности «модельного» нанофлюида.

2. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы явилось получение достоверных данных о теплопроводности «модельного» нанофлюида (базовая жидкость – изопропиловый спирт, наночастицы – Al_2O_3). Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– проанализировать основные факторы, влияющие на точность измерения теплопроводности нанофлюидов;

- экспериментально исследовать теплопроводность системы «изопропиловый спирт – наночастицы Al_2O_3 » двумя независимыми методами;
- обработать полученные экспериментальные данные в виде зависимости приведенной теплопроводности от температуры и концентрации наночастиц.

3. Анализ основных факторов, влияющих на точность измерения теплопроводности нанофлюидов

Для выяснения причин расхождения данных различных авторов необходимо проанализировать влияние следующих факторов на свойства нанофлюидов:

- способ получения нанофлюида и методика его подготовки к исследованиям;
- размер и форма исходных наночастиц, их концентрация; способность наночастиц образовывать кластеры, размеры кластеров;
- температура и давление;
- поверхностно-активные вещества (сурфактанты);
- тип и свойства базовых жидкостей;
- методика проведения эксперимента.

При исследовании теплопроводности кроме перечисленных выше факторов важно учитывать адаптацию методики проведения эксперимента к специфике нанофлюидов, влияние конвективной составляющей и эффекта «печной трубы», влияние диффузионных эффектов, влияние излучения и переизлучения для нанофлюидов на основе базовых жидкостей, полупрозрачных в ИК-области спектра и т. д.

3. 1. Способы получения нанофлюидов и методика их подготовки к исследованиям теплопроводности

В состав нанофлюида входят базовая жидкость и наночастицы какого-либо высокотеплопроводного материала. В качестве базовой жидкости чаще всего используют воду, этиленгликоль, масла и т. д. Материалом для наночастиц, как правило, служат химически стабильные металлы, окислы металлов, углерод (чаще всего в виде одно-, двух- или многостеночных трубок или фуллеренов).

Нанофлюиды должны удовлетворять набору требований: они должны быть равномерными, устойчивыми к агрегации и выпадению в осадок в течение длительного времени, в них должны отсутствовать химические реакции и т. д., при этом главной проблемой, по мнению многих исследователей, является агрегация.

Следует отметить, что склонность к агрегации 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) под влиянием разности плотностей с базовой жидкостью, а с другой стороны — склонны к образованию агрегатов. Описанная особенность наночастиц существенно влияет на технологии получения нанофлюидов и поддержания их в рабочем состоянии.

Существующие методы изготовления нанофлюидов подразделяют на одноступенчатые и двухступенчатые. При одноступенчатых методах нанофлюиды получают в течение одного технологического цикла.

Положительную специфику одношаговых технологий выражает то, что наночастицы получаются, как правило, очень мелкие (2–20 нм), агрегация наночастиц минимизируется, а получаемые нанофлюиды характеризуются как стабильные. Одноступенчатый метод VEROS (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate) состоит в том, что 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. Заметную нишу среди одноступенчатых занимают химические методы, в которых наножидкость получается в результате реакции восстановления под воздействием микроволнового излучения. На заключительном этапе приготовления наножидкости для улучшения ее равномерности могут добавляться химические дисперсанты, либо применяться ультразвуковая и микроволновая обработка.

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 агрегации. Как и в химических методах, для равномерного распределения частиц по базовой жидкости и уменьшения их агрегации используются разные способы, такие как обработка ультразвуком, обработка электромагнитным излучением определенных частот, регулирование кислотности наножидкости (аксидирование), добавка в нее поверхностно активных компонентов и др. 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.

Самым распространенным способом стабилизации нанофлюидов является добавление в ее состав поверхностно активных веществ (ПАВ) — дисперсантов (сурфактантов), таких как цитрат аммония, имидазолин, олеиновая и рицинолеиновая кислоты и т.д. Взаимодействие между молекулами ПАВ и молекулами растворителя всегда меньше взаимодействия между молекулами чистого растворителя. Поэтому растворитель выталкивает молекулы ПАВ из объема раствора на поверхность наночастиц. Молекулы ПАВ, обволакивая наночастицы, образуют так называемые мицеллы. Появляется понятие гидродинамического радиуса наночастиц. Это, по сути, радиус самой наночастицы плюс слой из молекул ПАВ. В результате накопления на поверхности наночастиц молекул этих веществ, слабо взаимодействующих друг с другом, межмолекулярное взаимодействие уменьшается из-за увеличения площади раздела фаз и поверхностное натяжение падает, что предотвращает слипание частиц.

В области малых концентраций поверхностное натяжение на границе растворителя с дисперсной средой резко уменьшается при добавлении ПАВ в раствор. При дальнейшем увеличении концентрации поверхностное натяжение уменьшается в меньшей степени, стремясь к постоянному значению. Это обусловлено уменьшением свободных от ПАВ адсорбционных цен-

тров, т. е. насыщением наночастиц молекулами дисперсанта.

Следует отметить, что при низких температурах такие суспензии довольно стабильны, но при повышении температуры связи между молекулами сурфактанта и наночастицами ослабевают или вовсе исчезают, что приводит к снижению устойчивости коллоидной системы.

Методика приготовления образцов нанофлюидов является, пожалуй, одним из ключевых факторов для получения высокого качества результатов экспериментальных исследований теплопроводности.

3. 2. Влияние концентрации наночастиц, их размера и формы на результаты измерения теплопроводности нанофлюидов

В опубликованных работах, обзор которых приведен в публикациях [1, 2], исследовался эффект влияния концентрации наночастиц на приведенную теплопроводность нанофлюидов λ_n/λ_0 (где λ_n – теплопроводность нанофлюида, λ_0 – теплопроводность базовой жидкости) при объемных концентрациях наночастиц, в основном, до 4–5 %.

Максимальное рост приведенной теплопроводности нанофлюидов составил 30–40 % для различных базовых жидкостей. Как правило, с ростом концентрации наночастиц приведенная теплопроводность нанофлюидов увеличивалась, однако в работе Ли и Петерсона [3] эффект влияния наночастиц на приведенную теплопроводность нанофлюидов уменьшался при увеличении концентрации от 6 до 10 %. Результаты работы Тимофеевой и соавт. [4] для этого же диапазона концентраций показывают противоположный результат.

Анализ влияния размера и формы наночастиц на приведенную теплопроводность нанофлюидов по опубликованным работам не позволяет найти не только закономерности, но и даже тенденции такого влияния. Этот вывод иллюстрирует рис. 1, на котором представлены результаты измерений теплопроводности нанофлюидов с наночастицами размером от 13 до 80 нм (базовая жидкость – этиленгликоль). Маркерами на этом и последующих рисунках обозначены экспериментальные данные.

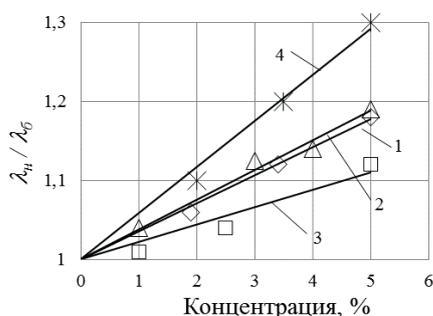


Рис. 1. Влияние размеров наночастиц на приведенную теплопроводность нанофлюидов на основе этиленгликоля 1–15 нм [5]; 2–35 нм [6]; 3–40 нм [4]; 4–80 нм [5]

Часть опытных данных показывает, что с ростом размера наночастиц приведенная теплопроводность нанофлюидов при фиксированной концентрации воз-

растает, другие данные приводят к противоположным выводам. Практически во всех публикациях указана сферическая форма наночастиц.

3. 3. Влияние температуры на результаты измерения теплопроводности нанофлюидов

Результаты некоторых исследований влияния температуры на приведенную теплопроводность нанофлюидов приведены на рис. 2.

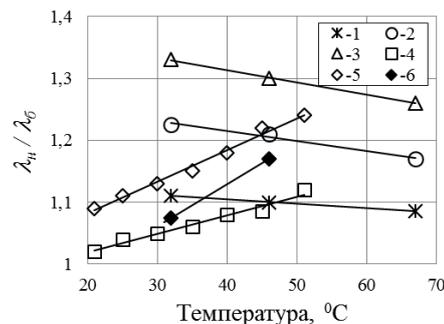


Рис. 2. Влияние температуры на приведенную теплопроводность нанофлюидов: 1, 2, 3 – данные [7] при концентрации $x=1,25\%$, $2,75\%$ и $4,25\%$; 4, 5 – данные [8] при $x=1\%$ и 4% ; 6 – данные [3] при $x=2\%$

Как видно из рис. 2, результаты этих измерений прямо противоположны. Часть из них показывает уменьшение эффекта влияния наночастиц на теплопроводность базовой жидкости с ростом температуры, другая часть – увеличение этого эффекта. Возможно, это связано с увеличением подвижности молекул и распадом кластеров (конгломератов) наночастиц. К такому же выводу пришли Мёрст и др. [9], изучая влияние добавки сурфактанта на рост приведенной теплопроводности при различных температурах.

3. 4. Влияние методик проведения эксперимента на результаты измерения теплопроводности нанофлюидов

Методика подготовки нанофлюида к исследованию, обеспечивающая его стабильность, и методика проведения эксперимента по теплопроводности, адаптированная к специфике изучения свойств нанофлюидов (влияние конвективной, диффузионной и радиационной составляющих) имеют первостепенное значение.

При измерении теплопроводности нанофлюидов использовались как стационарные (метод плоского горизонтального слоя), так и нестационарные (метод нагретой нити, метод «короткой» нагретой нити, метод нагретой микрополоски, метод температурных колебаний, так называемый «3 ω » метод, метод фототермической радиометрии, метод теплового компаратора), а также неинвазивные оптические методы измерений. В рамках настоящей работы нет возможности проанализировать все указанные методы измерений теплопроводности нанофлюидов с точки зрения их точности, однако следует отметить их некоторые характерные особенности.

Наибольший объем экспериментальных данных к настоящему времени получен с помощью нестационарного метода нагретой нити. Этот метод использовался многими авторами для исследования теплопроводности

сти различных однофазных жидкостей. Такое широкое применение нестационарного метода нагретой нити объясняется наличием ряда преимуществ перед другими методами исследований: относительная простота конструкции измерительного узла; метод обеспечивает достаточную точность для однофазных сред и весьма экспрессивен (процесс измерения занимает не более нескольких секунд). Теория этого метода основана на одномерном решении уравнения Фурье для линейного источника теплоты, который представляет собой бесконечно длинную и тонкую нить, рассеивающую тепло в бесконечную среду. Вместе с тем, влияние граничных условий, конвективной, диффузионной и радиационной составляющих в опытах с нестационарным методом нагретой нити для нанофлюидов не изучено.

Ряд усовершенствований нестационарных методов был принят в более поздних работах. Например, Хи, Шанг и др. [10, 11] использовали нестационарный метод «короткой» нагретой нити, теория которого основана на двухмерном решении уравнения Фурье для линейного источника теплоты с тем же отношением длины к диаметру, что и образец нанофлюида. Такая методика позволяет учитывать краевые эффекты.

Попытку избежать агрегации наночастиц и их осаждения предпринял Mintsa [12], который поместил устройство для перемешивания нанофлюида рядом с измерительным устройством, реализующим нестационарный метод нагретой нити. В некоторых работах нагреватель и датчик температуры были разделены друг от друга (в качестве нагревателя использовался лазерный луч, а в качестве датчика температуры, термометр сопротивления [13]), однако это не привело к увеличению точности полученных результатов.

В последние годы активно разрабатывались оптические методы измерения теплопроводности, в которых датчик температуры и нагреватель разделены друг от друга, обеспечивая потенциально более точные данные. Измерения в таком устройстве происходят в течение нескольких микросекунд, то есть гораздо быстрее, чем при измерениях с помощью «классического» варианта нестационарного метода нагретой нити. Влияние естественной конвекции в таких условиях пренебрежимо мало.

Сравнение результатов измерений теплопроводности нанофлюидов на основе наночастиц Al_2O_3 различными методами приведено на рис. 3.



Рис. 3. Влияние методов измерения на приведенную теплопроводность нанофлюидов на основе наночастиц Al_2O_3 : 1 — метод плоского слоя [14]; 2 — нестационарный метод нагретой нити [15]; 3 — метод температурных колебаний [8]; 4 — «3w» метод [16]

Как видно из этого графика, расхождения данных различных авторов значительно превосходят заявленную ими погрешность. Причины таких расхождений неочевидны, однако понятно, что наибольшего доверия заслуживают результаты, полученные при варьировании основных влияющих факторов или несколькими независимыми методами.

4. Экспериментальное исследование теплопроводности изопропилового спирта с наночастицами Al_2O_3

Для экспериментального исследования теплопроводности системы изопропиловый спирт, наночастицы Al_2O_3 были разработаны два измерительных устройства [17]. Первое из них реализует стационарный метод нагретой нити и даёт возможность проводить опыты при различных, отличающихся между собой в 2–3 раза перепадах температур, что позволяет оценить влияние и конвекции, и радиации на результаты измерений.

Часть опытов проводилась на этом измерительном устройстве в нестационарном режиме с учётом ряда ограничений, связанных с невыполнением граничных условий при решении уравнения Фурье для линейного источника теплоты (диаметр нити-нагревателя составил 0,1 мм, толщина слоя среды, 0,55 мм). При выполнении граничных условий для любого фиксированного расстояния в радиальном направлении изменение температуры может быть представлено как

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right), \quad (1)$$

откуда следует, что график изменения температуры как функция логарифма времени представляет собой прямую линию, а наклон этого графика пропорционален коэффициенту теплопроводности. Таким образом, для расчета теплопроводности по данным эксперимента необходимо измерять тепловой поток и изменение температуры во времени в той области, где наблюдается линейная зависимость температуры от логарифма времени.

Как показали наши исследования, такая зависимость соблюдается в диапазоне $-2 \leq \ln\tau \leq 0$ при различных тепловых нагрузках. При $\ln\tau \leq -2$ и при $\ln\tau \geq 0$ невыполнение граничных условий приводит к нелинейности зависимости температуры от $\ln\tau$ и, соответственно, к ошибкам в расчёте λ . Следует отметить, что измерения теплопроводности на одной и той же экспериментальной установке в стационарном и нестационарном режимах для нанофлюидов проведены впервые.

Второе измерительное устройство реализует «классический» вариант нестационарного метода нагретой нити [17]. Платиновая нить диаметром 0,05 мм и длиной 61 мм является одновременно нагревателем и термометром сопротивления, а толщина слоя среды составляет 12 мм. Результаты измерений температуры нити в функции логарифма времени с «шагом» по времени 0,02 сек при различных значениях греющего тока показали, что практически во всем диапазоне измеренных параметров угол наклона линии, выражающей зависимость температуры от $\ln\tau$, меняется незна-

чительно. Анализ этих данных для разных временных диапазонов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта $\partial\Delta T/\partial(\ln t)$, λ и отклонений от среднего $(\lambda-\lambda_c)/\lambda_c \cdot 100$, % для разных временных диапазонов

$\ln t$	$\partial\Delta T/\partial(\ln t)$	λ , Вт/(м·К)	$(\lambda-\lambda_c)/\lambda_c \cdot 100$, %
-4...-3	1,251	0,1539	-1,11
-3...-2	1,232	0,1557	0,04
-2...-1	1,242	0,1544	-0,79
-1...0	1,222	0,1570	0,88
0...1	1,234	0,1554	-0,15
1...2	1,219	0,1574	1,14

Экспериментальные данные о теплопроводности изопропилового спирта и изопропилового спирта с добавкой наночастиц Al_2O_3 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные о теплопроводности изопропилового спирта (ИПС) и изопропилового спирта с добавкой наночастиц Al_2O_3 (1 и 3 - измерения на первой ячейке в стационарном и нестационарном режимах, соответственно, 2 - измерения на второй ячейке)

t , °C	λ , Вт/(м·К)	t , °C	λ , Вт/(м·К)
ИПС (1)		ИПС+1,19% Al_2O_3 (3)	
12,5	0,1415	30,9	0,1450
60,0	0,1348	ИПС+2,64% Al_2O_3 (1)	
ИПС (2)		43,2	0,1517
10,7	0,1414	43,2	0,1512
10,7	0,1418	61,5	0,1491
13,5	0,1420	63,3	0,1489
40,8	0,1375	63,2	0,1483
40,8	0,1377	63,3	0,1489
43,6	0,1373	63,3	0,1495
60,9	0,1340	ИПС+2,64% Al_2O_3 (2)	
63,2	0,1345	12,8	0,1556
63,2	0,1342	14,3	0,1550
ИПС (3)		16,0	0,1538
14,6	0,1420	17,9	0,1536
31,7	0,1380	45,0	0,1507
61,3	0,1350	46,2	0,1514
ИПС+1,19% Al_2O_3 (1)		48,0	0,1508
40,8	0,1430	50,0	0,1513
42,0	0,1428	52,0	0,1500
43,6	0,1425	66,7	0,1483
60,9	0,1405	69,1	0,1487
60,9	0,1398	71,7	0,1482
ИПС+1,19% Al_2O_3 (2)		74,7	0,1471
13,3	0,1484		
14,9	0,1478		
16,6	0,1470		
46,8	0,1434		
48,5	0,1419		
50,6	0,1420		

Экспериментальные данные обработаны в виде зависимости приведенной теплопроводности λ_n / λ_0 от температуры и концентрации наночастиц

$$\lambda_n / \lambda_0 = 1 + (3,36 \times 10^{-2} + 5,0 \times 10^{-4} t) x. \quad (2)$$

Отклонения всех результатов измерений, включая базовую жидкость и наночастицы, от расчета по (2), не превышают 1,5 %.

Несмотря на большое количество существующих моделей расчета теплопроводности наночастиц, многие из них были разработаны для конкретных приложений и требуют для своего использования ряда трудно определяемых параметров. В связи с этим, авторы данной статьи решили ограничиться сравнением полученных нами экспериментальных данных с расчетом по классической модели Максвелла [18] и ее модификациями Гамильтона и Кроссера [23, 24]. Это сравнение представлено на рис. 4.

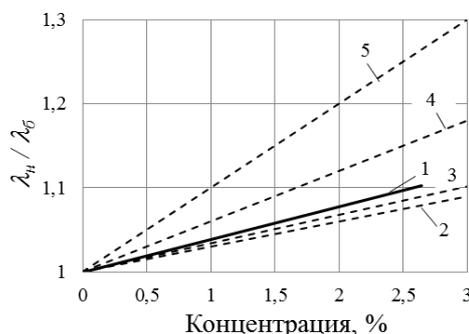


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных по теплопроводности системы «изопропиловый спирт-наночастицы Al_2O_3 » с расчетом по различным моделям: 1 — эксперимент при 40 °C; 2 — расчет по моделям Максвелла и Гамильтона-Кроссера для Al_2O_3 (сферические наночастицы); 3 — расчет по модели Гамильтона-Кроссера для CuO (цилиндрические наночастицы); 4, 5 — расчет по модели Гамильтона-Кроссера для Al_2O_3 и CuO , соответственно, (сферические наночастицы)

Как видно из этого графика, лучшее совпадение с экспериментом даёт расчет по моделям Максвелла и Гамильтона-Кроссера для цилиндрических наночастиц.

5. Выводы

Проведен анализ влияния основных факторов, определяющих точность измерения теплопроводности наночастиц. Показано, что методика подготовки наночастиц к исследованиям должна обеспечивать их стабильность и устойчивость к агломерации. При росте концентрации наночастиц приведенная теплопроводность наночастиц, как правило, увеличивается. При выборе методики проведения эксперимента по теплопроводности наночастиц предпочтение может быть отдано нестационарному методу нагретой нити.

Экспериментально исследована теплопроводность системы «изопропиловый спирт – наночастицы Al_2O_3 » двумя независимыми методами – стационарным и нестационарным методами нагретой нити. Полученные экспериментальные данные обработаны в виде зависимости приведенной теплопроводности от температуры и концентрации наночастиц. Отклонения всех результатов измерений, включая базовую жидкость и наночастицы, от расчета по предложенной модели не превышают 1,5 %.

Литература

1. Kleinstreuer, C. Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review [Text] / C. Kleinstreuer, Y. Feng // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – Vol. 6, Issue 1. – P. 229. doi: 10.1186/1556-276x-6-229
2. Sridhara, V. Al₂O₃-based nanofluids: a review [Text] / V. Sridhara, L. N. Satapathy // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – Vol. 6, Issue 1. – P. 456. doi: 10.1186/1556-276x-6-456
3. Li, C. H. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity nanoparticle suspensions (nanofluids) [Text] / C. H. Li, G. P. Peterson // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 99, Issue 8. – P. 084314. doi: 10.1063/1.2191571
4. Timofeeva, E. V. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory [Text] / E. V. Timofeeva, A. N. Gavrilov, J. M. McCloskey, Y. V. Tolmachev // *Physical Review E*. – 2007. – Vol. 76, Issue 6. – P. 061203. doi: 10.1103/physreve.76.061203
5. Xie, H. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles [Text] / H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 91, Issue 7. – P. 4568–4572. doi: 10.1063/1.1454184
6. Eastman, J. A. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles [Text] / J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thomson // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 78, Issue 6. – P. 718–720. doi: 10.1063/1.1341218
7. Masuda, H. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ -Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ ultra-fine particles) [Text] / H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma // *Netsu Bussei*. – 1993. – Vol. 7, Issue 4. – P. 227–233. doi: 10.2963/jjtp.7.227
8. Das, S. K. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids [Text] / S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel // *Journal of Heat Transfer*. – 2003. – Vol. 125, Issue 4. – P. 567–574. doi: 10.1115/1.1571080
9. Murshed, S. M. S. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids [Text] / S. M. S. Murshed, K. C. Leong, C. Yang // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2008. – Vol. 47, Issue 5. – P. 560–568. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004
10. Zhang, X. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles [Text] / X. Zhang, H. Gu, M. Fujii // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 100, Issue 4. – P. 1–5. doi: 10.1063/1.2259789
11. Xie, H. Q. Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials [Text] / H. Q. Xie, H. Gu, M. Fujii, X. Zhang // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17, Issue 1. – P. 208–214. doi: 10.1088/0957-0233/17/1/032
12. Mints, H. A. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids [Text] / H. A. Mints, G. Roy, C. T. Nguyen, D. Doucet // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2009. – Vol. 48, Issue 2. – P. 363–371. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.009
13. Ali, F. M. The effect of volume fraction concentration on the thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids: numerical and experimental [Text] / F. M. Ali, W. M. M. Yunus, M. M. Moxsin, Z. A. Talib // *Review of Scientific Instruments*. – 2010. – Vol. 81, Issue 7. – P. 074901. doi: 10.1063/1.3458011
14. Wang, X. Thermal conductivity of nanoparticle, fluid mixture [Text] / X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. – 1999. – Vol. 13, Issue 4. – P. 474–480. doi: 10.2514/2.6486
15. Lee, S. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [Text] / S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, J. A. Eastman // *Journal of Heat Transfer*. – 1999. – Vol. 121, Issue 2. – P. 280–289. doi: 10.1115/1.2825978
16. Oh, D. W. Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using 3 ω method [Text] / D. W. Oh, A. Jain, J. K. Eaton, K. E. Goodson, J. S. Lee // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2008. – Vol. 29, Issue 5. – P. 1456–1461. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.007
17. Грушко, В. О. Теплопроводность некоторых минеральных и синтетических компрессорных холодильных масел [Текст] / В. О. Грушко, В. З. Геллер // *Холодильная техника и технология*. – 2012. – № 3 (137). – С. 4–9.
18. Maxwell, J. C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Second edition [Text] / J. C. Maxwell. – Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.