УДК 53.082

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТИ¹

© 2023 г. Ю. В. Шацких¹, *, А. В. Костановский^{1, 2}, М. Г. Зеодинов^{1, 2}, В. А. Милютин¹

¹Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: shatskih_jv@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 12.09.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

В статье рассмотрены получившие широкое распространение методы определения теплопроводности наножидкости: метод нагретой нити (проволоки) и 3ω -проводной метод. Предложено использование метода регулярного режима для определения коэффициента теплопроводности. Показаны особенности конструкции измерительного калориметра и методики проведения эксперимента: длительность эксперимента должна быть не менее 800 с при коэффициенте теплоотдачи от термостатирующей жидкости к поверхности калориметра не менее 2000 Вт/(м² К). Проведенные исследования на дистиллированной воде показали отклонение от табличных данных на 10–11%. Дальнейшие исследования с применением калориметров других конструкций представляются перспективными.

DOI: 10.31857/S0040364423030201

ВВЕДЕНИЕ

Повышение интенсивности теплообмена является актуальной и важной задачей. Особый интерес представляют методы повышения коэффициента теплоотдачи в системах охлаждения энергетического оборудования. Последние два десятилетия перспективным направлением исследований в этой области является изучение теплообмена с применением наножидкостей. К настоящему времени отечественными и зарубежными авторами выполнен достаточно большой объем исследований [1–3]. Научный поиск ведется в нескольких направлениях: выбор теплопроводного материала и базовой жидкости, исследование влияния концентрации наночастиц и их размера на интенсивность теплообмена. Для повышения теплопроводности наножидкости в качестве теплопроводного материала используются как чистые металлы (Au, Cu, Fe) и их оксиды (CuO, Al₂O₃, TiO₂), так и графит (углеродные нанотрубки, нанографен). В качестве базовой жидкости применяются в основном дистиллированная вода, минеральное масло или этиленгликоль.

Практически все авторы отмечают увеличение теплопроводности наножидкости в среднем до 40% по сравнению с базовой жидкостью при кон-

центрации наночастиц в экспериментах до 3%. С другой стороны, значения теплопроводности конкретной наножидкости заметно различаются в работах исследователей [4–7]. Это связано с тем, что наножидкость является сложным объектом для изучения. Как правило, исследователи перед экспериментом предварительно готовят наножидкость [8]. Однако воспроизвести наножидкость, аналогичную по свойствам той, которую исследовали другие авторы, крайне сложно. Кроме того, методическая база и ее экспериментальная реализация для определения теплопроводности наножидкости строго индивидуальна. В основном это метод нагретой нити (проволоки) [9–13] и 3ω -проводной метод [14–16], ориентированные не столько на наножидкость, сколько на свойства материала источника ее нагрева.

В этой связи использование иных методических подходов к определению теплофизических свойств наножидкости становится принципиально необходимым.

В данной работе приведены результаты апробации метода регулярного режима для измерения температуропроводности и теплопроводности наножидкости. Метод сравнительно прост в реализации, кроме того, он позволяет определить не только теплопроводность, но и температуропроводность жидкости.

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ

Измерения теплопроводности наножидкости проводили достаточно большое количество исследователей как отечественных, так и зарубежных [9–18]. В абсолютном большинстве случаев исследователи для экспериментов использовали измерительные приборы, которые сами изготавливали в единичном экземпляре.

В настоящее время исследователи используют несколько методов измерения теплопроводности наножидкости. Однако практически все применяемые методы имеют те или иные недостатки, которые существенно влияют на результаты измерений.

Наибольшую сложность при определении теплопроводности наножидкости представляет тот факт, что в процессе переноса теплоты присутствуют как кондуктивная, так и конвективная составляющие.

Еще на перенос теплоты в наножидкости влияет и термодиффузия, т.е. перемещение частиц под действием градиента температуры. Это явление также называется термофорезом или эффектом Соре. Поэтому в большинстве методов определения теплопроводности жидкости используется кратковременный нагрев рабочего элемента (до 1 с) на сравнительно незначительную величину (не более 10 К). При таком нагреве влиянием конвекции и термодиффузии можно пренебречь.

Стоит отметить, что теплообмен в наножидкости исследуется при температурах до 100°C.

В большинстве исследований для экспериментального определения теплопроводности наножидкости используется нестационарный метод нагреваемой нити (проволоки). К проволоке диаметром 25 мкм, изготовленной из платины либо тантала, в течение периода времени от 20 мс до 1 с подводится постоянный электрический ток. Проволока нагревается на 4–10 К. Проволоку можно рассматривать как линейный источник теплоты, который рассеивает теплоту в бесконечную среду. Для определения коэффициента теплопроводности необходимо измерить тепловой поток и изменение температуры во времени. Интервал времени должен быть таким, чтобы зависимость температуры от логарифма времени была линейной. По результатам измерений строят график изменения температуры как функции логарифма времени, которая является прямой линией, а наклон графика пропорционален коэффициенту теплопроводности.

Использование метода нагретой нити для исследования теплопроводности именно наножидкости связано с некоторыми трудностями, обусловленными прежде всего физико-химическими свойствами материала самой проволоочки, а именно чистотой поверхности проволоочки, стойкостью к химическому взаимодействию с базовой жидкостью. Это приводит к скоплению наноча-

стиц на поверхности проволоки, что неконтролируемо изменяет как тепловые, так и электрические характеристики в области контакта между наножидкостью и поверхностью греющей проволоочки. Для решения этой проблемы проволока покрывается электрическим изоляционным материалом, например тефлоном. Можно использовать танталовую проволоку, на поверхности которой образуется слой пентоксида тантала, также служащий электрическим изолятором.

В некоторых исследованиях используется 3ω -проводной метод, который основан на измерениях за период времени повышения температуры источника теплоты, погруженного в исследуемую жидкость. В качестве нагревателя используется проволока малого диаметра (несколько десятков микрон), которая также выполняет роль термометра сопротивления. Данный метод позволяет одновременно определить температуропроводность и теплопроводность.

Сущность метода заключается в следующем. На проволоку (нагреватель) подается переменный ток, количество теплоты, выделившееся при прохождении через проволоку электрического тока, определяется по закону Джоуля–Ленца и представляет собой суперпозицию источника постоянного тока и 2ω модулированного источника тепла. Выделившаяся тепловая мощность порождает изменение температуры в нагревателе, которое является суперпозицией компоненты постоянного тока и компоненты 2ω переменного тока. Электрическое сопротивление металлической проволоки в условиях эксперимента зависит от температуры и представляет собой 2ω -компоненту переменного тока в сопротивлении проволоки. Коэффициент теплопроводности жидкости λ_f определяется по наклону 2ω изменения температуры металлической проволоки по отношению к частоте ω .

Таким образом, устанавливается зависимость коэффициента теплопроводности жидкости от изменения температуры проволоки и частотной характеристики переменного электрического тока.

3ω -проводной метод имеет несколько преимуществ перед методом нагретой нити:

- 1) температурные колебания в исследуемой жидкости достаточно малы (меньше 1 К), что позволяет сохранить постоянные свойства жидкости;
- 2) фоновые шумы, такие как изменение температуры, гораздо слабее влияют на результаты измерений.

Точность при определении теплопроводности описанным методом в большей степени зависит от определения сопротивления моста Уинстона, применяемого в экспериментальной установке. Недостатком 3ω -метода является то, что твердая поверхность нагревателя обычно имеет тепловую инерционность гораздо больше, чем у жидкости.

Поэтому теплота, выделяемая в металлическом нагревателе, делится между твердой подложкой и жидкостью в зависимости от соотношения их тепловых инерционностей. Можно предположить, что большая часть тепла будет поступать в подложку, а не в жидкость. Кроме того, сама измерительная установка достаточно сложная и включает в себя мост Уинстона, генератор сигналов, анализатор спектра, осциллограф.

Общей особенностью двух описанных методов является то, что коэффициент теплопроводности определяется косвенно через связь тепловых характеристик исследуемой жидкости и измеряемых электрических характеристик нагревателя.

Для измерения теплопроводности наножидкости применяется стационарный метод плоского слоя. Сущность метода заключается в следующем: исследуемая наножидкость заливается в тонкий плоский слой, находящийся между двумя пластинами – нагревателем и холодильником. Для определения коэффициента теплопроводности по уравнению Фурье необходимо измерить тепловой поток и градиент температуры. Достоинством стационарного метода плоского слоя по сравнению с вышеописанными методами является его простота. Однако широкого применения этот метод не нашел, поскольку точность измерений существенно зависит от выполнения условия одномерности потока теплоты. Экспериментальные установки, работающие по методу плоского слоя, отличаются способом уменьшения боковых утечек теплоты. Для определения теплопроводности жидкостей необходима специальная ячейка [17]. Опубликованы результаты исследования теплопроводности наножидкости на основе *n*-пентана и оксида алюминия, а также ортофосфорной кислоты [17, 18]. Автор исследований подчеркивает, что разработанная им установка обеспечивает высокую точность измерений (максимальная неопределенность – 2%). Прибор запатентован [17], но серийно не изготавливается.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ

Ранее метод регулярного тентового разжима успешно использовался для исследования теплофизических свойств, а именно температуропроводности и теплопроводности различных теплоизоляционных, строительных и других технических твердых материалов [19]. В работе [20] приведены результаты применения данного метода для определения температуропроводности наножидкости. Опубликованные данные, во-первых, указывают на возможность надежного использования метода регулярного тентового разжима для исследования наножидкости (погрешность определения коэффициента температуропроводности не пре-

вышает 1.73%) и, во-вторых, свидетельствуют о его простоте и доступности.

Существо метода заключается в следующем. Согласно второй теореме Кондратьева [21], при числе Био $Bi \rightarrow \infty$ темп охлаждения прямо пропорционален коэффициенту температуропроводности

$$a = Km_{\infty},$$

где K – коэффициент формы тела.

Число Био определяется как

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи от термостатирующей жидкости к калориметру, Вт/(м² К); R – радиус калориметра, м; λ – коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м К).

Соответственно, для определения коэффициента температуропроводности нужно определить темп охлаждения

$$m_{\infty} = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1},$$

где $\vartheta = t - t_0$ – избыточная температура, представляющая собой разность между температурой исследуемой жидкости и температурой греющей (охлаждающей) среды. Для определения избыточной температуры используют измеренные значения температуры t_1 и t_2 в произвольные моменты времени τ_1 и τ_2 в области регулярного режима.

Таким образом, для определения коэффициента температуропроводности необходимо выполнить достаточно простые измерения температуры в фиксированной точке внутри исследуемого образца в течение времени.

Авторы разработали установку для определения коэффициента теплопроводности методом регулярного режима. Установка состоит из стального цилиндрического калориметра радиусом R и высотой Z . В калориметре установлены две термодпары: одна на оси ($r_2 = 0$), вторая на расстоянии $r_1 = 0.7R$ от оси. Термодпары располагаются на одной изотермической поверхности. Калориметр заполняется исследуемой жидкостью при температуре 20°C и погружается в термостат, заполненный водой. Термостатирующая жидкость постоянно перемешивается, ее температура в разных сериях экспериментов поддерживалась на уровне 40–60°C. В процессе нагрева исследуемой жидкости в калориметре устанавливается распределение температуры жидкости во времени. На стадии регулярного режима нагрева определяется темп нагрева m_{∞} , а затем коэффициент температуропроводности. Использование в качестве гре-

Результаты эксперимента

Температура, °С	Коэффициент температуропроводности, $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$		Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м К})$	
	экспериментальные данные	табличные значения [22]	экспериментальные данные	табличные значения [22]
30	1.643	1.487	0.686	0.615
35	1.664	1.51	0.689	0.622
40	1.684	1.533	0.692	0.629

ющей жидкости воды позволяет провести эксперимент при условии $Bi \rightarrow \infty$.

Для определения теплопроводности требуются данные об удельной теплоемкости c_p и плотности жидкости ρ

$$\lambda = ac_p\rho. \quad (1)$$

Необходимым условием реализации этого метода является высокий коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке калориметра $\alpha \rightarrow \infty$. На практике достаточно обеспечить интенсивное перемешивание термостатирующей жидкости в калориметре, тогда коэффициент теплоотдачи примерно равен $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

При кажущейся очевидной простоте метода его реализация сопровождается определенными сложностями. Во-первых, размеры калориметра не могут быть произвольными: термодары не должны располагаться слишком близко друг к другу, иначе графики $\ln \vartheta_1 = f(\tau)$ и $\ln \vartheta_2 = f(\tau)$ будут накладываться друг на друга.

Для определения оптимальных размеров калориметра проведены пробные эксперименты. Использовались два цилиндрических калориметра: первый изготовлен из тонкой меди радиусом 0.02 м и высотой 0.06 м , второй радиусом 0.05 м и высотой 0.16 м изготовлен из тонкого алюминия. Каждый калориметр оснащен двумя хромель-копелевыми термодарами. Эксперименты проводились в термостате в водяной и воздушной банях при нагреве воды в термостате до 42°С . Точность температурных измерений составила 0.1°С .

Результаты экспериментов показали, что при охлаждении калориметра в воде наблюдается практически полное совпадение показаний двух термодаров. В то же время в воздушной ванне разница показаний термодаров составила уже порядка 1°С . Погрешность эксперимента не превышает 15% .

Также метод регулярного режима можно применять только при условии реализации одномерного температурного поля в калориметре. Это достигается за счет правильно подобранного соотношения высоты и радиуса калориметра. При радиусе 50 мм калориметра его высота равна $Z = 160 \text{ мм}$.

Во-вторых, известно, что регулярный режим наступает при $Fo = \frac{a\tau}{R^2} \geq 0.3$, соответственно, например, для воды время эксперимента должно быть не менее 800 с . Здесь τ – время нагрева (охлаждения). Таким образом, эксперимент относительно, например, метода горячей проволоки является длительным. Так, определенный методом регулярного режима коэффициент теплопроводности следует рассматривать как эффективный, т.е. учитывающий перенос теплоты в жидкости, залитой в калориметр, не только теплопроводностью, но и термодиффузией. Использование эффективного коэффициента теплопроводности в дальнейших расчетах оправдано тем, что в реальных условиях процессы теплопроводности и термодиффузии протекают совместно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве экспериментальной жидкости использована обессоленная вода, подготовленная методом ионного обмена, с электропроводимостью 80 мкСм м . Результаты эксперимента приведены в таблице. Там же приведены и табличные значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности. Значения коэффициента теплопроводности взяты из [22], значения коэффициента температуропроводности получены по формуле (1) на основе справочных данных [22]. Табличные значения приведены для воды с электропроводимостью менее 2 мкСм м .

Различие между табличными и экспериментальными данными составляет $10\text{--}11\%$. Это частично можно объяснить различием в составах воды.

Также стоит отметить, что перспективным является использование калориметров другой конструкции [21], которые позволяют проводить эксперимент при низком значении коэффициента теплоотдачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения теплопроводности наножидкостей в настоящее время наибольшее распространение получили метод нагретой нити (проволоки) и 3ω -проводной метод. Оба метода позволя-

ют определить коэффициент теплопроводности косвенно по связи тепловых характеристик исследуемой жидкости и измеряемых электрических характеристик нагревателя. Стационарный метод плоского слоя использован в единичных исследованиях. В данной работе рассмотрено применение метода регулярного режима для определения коэффициента теплопроводности жидкости. Метод прост в реализации и не требует дорогостоящего оборудования. Проведенные эксперименты позволили определить размеры калориметра и отработать методику измерений. Коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности, определенные данным методом, отличаются от табличных значений на 10–11%. Таким образом, перспективно использовать калориметры другой конструкции, которые позволяют проводить эксперимент при низком значении коэффициента теплоотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chavez Panduro E.A., Finotti F., Lervåg K.Y., Largiller G.* A Review of the Use of Nanofluids as Heat-transfer Fluids in Parabolic-trough Collectors // *Appl. Therm. Eng.* 2022. V. 211. P. 118346.
2. *Shatskikh Y.V., Kostanovsky A.V.* Characteristic Features of Nanofluids Application in Power Engineering // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. P. 032028.
3. *Фомин А.А., Фомина Л.Н.* Анализ эмпирических корреляций теплофизических свойств водных суспензий наночастиц оксида алюминия // *Теплофизика и аэромеханика.* 2020. Т. 27. № 2. С. 169.
4. *Jwo C.S., Teng T.P., Hung C.J., Guo Y.T.* Research and Development of Measurement Device for Thermal Conductivity of Nanofluids // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2005. V. 13. P. 55.
5. *Safiei W., Rahman M., Kulkarni R., Ariffin N., Malek Z.A.* Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids // *J. Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences.* 2020. № 74. P. 66.
6. *Konstantinos D.A., Georgia J.T., Marc J.A., William A.W.* Necessary Conditions for Accurate, Transient Hot-wire Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Nanofluids are Seldom Satisfied // *Int. J. Thermophys.* 2016. № 37(8). <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2083-8>
7. *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.
8. *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.
9. *Минаков А.В., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И., Лобасов А.С.* Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // *ИФЖ.* 2015. Т. 88. № 1. С. 148.
10. *Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И., Гузей Д.В.* Измерение теплопроводности и коэффициента теплоотдачи наножидкостей с одностенными нанотрубками // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 5. С. 692.
11. *Пряжников М.И., Минаков А.В., Гузей Д.В., Рудяк В.Я.* Теплопроводность наножидкостей на основе воды и этиленгликоля с наночастицами различных материалов // *Матер. 8-й Рос. нац. конф. по теплообмену.* М.: НИУ “МЭИ”, 2022. С. 237.
12. *Prasad T.R., Krishna K.R., Sharma K.V., Mantravadi N.* Вязкость и теплопроводность наножидкостей кобальта и диоксида кремния в оптимальной смеси глицерина и воды // *Коллоид. журн.* 2022. Т. 84. № 2. С. 213.
13. *Yufeng G., Zhang T., Zhangn D., Wang O.* Experimental Investigation of Thermal and Electrical Conductivity of Silicon Oxide Nanofluids in Ethylene Glycol/Water Mixture // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2018. № 117. P. 280.
14. *De Koninck D.* Thermal Conductivity Measurements Using the 3-Omega Technique: Application to Power Harvesting Microsystems. Montreal: McGill University, 2008. 106 p.
15. *Moon I.K., Jeong Y.H., Kwon S.I.* The 3 ω Technique for Measuring Dynamic Specific Heat and Thermal Conductivity of a Liquid or Solid // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. № 67(1). P. 29.
16. *Жаров А.А., Савинский Н.Г., Павлов А.А., Евдокимов А.Н.* Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости // *Фундаментальные исследования.* 2014. № 8 (Ч. 6). С. 1345.
17. *Гусейнов Г.Г.* Устройство для измерения теплопроводности. Патент на изобретение № 2096773. Кл. МПК-G01N25/00. 20.11.1997.
18. *Guseinov G.G., Abdulagatov I.M.* Thermal-conductivity Measurements of Aqueous Orthophosphoric Acid Solutions in the Temperature Range From (293 to 400) K and at Pressures up to 15 MPa // *Int. J. Thermophys.* 2014. V. 35. № 2. P. 218.
19. *Костановский А.В.* Регулярный тепловой режим и его приложение для измерения тепловых свойств твердых тел. Нестационарная теплопроводность. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 32 с.
20. *Сафаров М.М., Мирзоев С.Х., Гуломов М.М и др.* Влияние углеродных нанотрубок на поведения теплопроводности и температуропроводности жидкого диэтилового эфира // *Вестн. Казанск. нац. технол. ун-та.* 2017. Т. 20. № 7. С. 13.
21. *Кондратьев Г.М.* Регулярный тепловой режим. М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1954. 408 с.
22. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Спр. ГСССД Р-776-98. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 168 с.