

УДК 53.082

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ

Жаров А.В., Савинский Н.Г., Павлов А.А., Евдокимов А.Н.
ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, e-mail: pavlova@list.ru

При увеличении удельных мощностей двигателей внутреннего сгорания возрастает количество теплоты, которое необходимо отводить от нагретых узлов и деталей. Эффективность современных систем охлаждения и способ увеличения интенсивности теплопередачи практически достигли своего предела. Целью данной работы является исследование инновационных охлаждающих жидкостей для систем охлаждения теплоэнергетических устройств на основе двухфазных систем, состоящих из базовой среды (вода) и наночастиц. Рассмотрен один из методов измерения теплопроводности жидкости под названием 3ω -hot-wire. Представлены результаты измерения коэффициента теплопроводности наножидкости на основе оксида графена при различной концентрации последнего. Установлено, что при применении 1,25% графена коэффициент теплопроводности наножидкости увеличился на 70%.

Ключевые слова: теплопроводность, коэффициент теплопроводности, оксид графена, наножидкость, система охлаждения, испытательный стенд

EXPERIMENTAL METHOD OF MEASUREMENT OF HEAT CONDUCTIVITY OF NANOLIQUID

Zharov A.V., Savinskiy N.G., Pavlov A.A., Evdokimov A.N.
FGBOU VPO «The Yaroslavl state technical university», Yaroslavl, e-mail: pavlova@list.ru

With the increase in the specific capacities of internal combustion engines increases the amount of heat that must be removed from the heated components and parts. The effectiveness of modern cooling systems and way of increasing the heat transfer rate almost reached its limit. The aim of this work is to study innovative fluids for cooling systems of heat-and-power devices on the basis of two-phase system consisting of a baseline environment (water) and nanoparticles. Considered one of the methods thermal conductivity measurements using the $3\text{-}\Omega$ Technique. Presents the results of measurement of heat conductivity coefficient of nanofluids graphene-based at different concentrations of the latter. It is established that at the use of 1.25% of graphene conductivity coefficient of nanofluids increased by 70%.

Keywords: heat conductivity, heat conductivity coefficient, decanter oxide, nanoliquid, cooling system, test bench

Известно, что при современных тенденциях повышения удельных мощностей двигателей внутреннего сгорания, а также к более высоким скоростям и меньшим размерам для микроэлектронных устройств постоянно возрастает количество теплоты, которое необходимо отводить от нагретых узлов и деталей. Применение различных теплопроводящих жидкостей для отвода тепла является одним из наиболее распространенных и эффективных способов. Эффективность современных конструкций охлаждающих устройств, как и обычный способ увеличения интенсивности теплопередачи, практически достигли своего предела. Известно, что обычные охлаждающие жидкости (вода, масла, гликоли, фторуглероды), обладают достаточно низкой теплопроводностью (табл. 1), что является ограничивающим фактором в современных конструкциях систем охлаждения. Для увеличения их теплопроводности можно создать многофазную (минимум двухфазную) дисперсную среду, где роль дисперсии выполняют частицы со значительно большим коэффициентом теплопроводности, чем базовая жидкость. Максвелл в 1881 году пред-

ложил добавить твердые частицы с высокой теплопроводностью в базовую теплопроводящую охлаждающую жидкость.

Идея состоит в том, чтобы смешать металлические материалы, такие как серебро, медь, железо, и неметаллические материалы, такие как глинозем, CuO, SiC и углеродные трубки, обладающие более высокой теплопроводностью по сравнению с базовой теплопроводящей жидкостью с меньшим коэффициентом теплопроводности. Первоначально твердые частицы (такие как серебро, медь, железо, углеродные трубки, обладающие более высокой теплопроводностью по сравнению с базовой жидкостью) микронных и даже миллиметровых размеров были смешаны с базовыми жидкостями с получением суспензий. Достаточно большой размер применяемых частиц и трудности в производстве наноразмерных частиц стали ограничивающими факторами в применении таких суспензий. Указанная проблема была решена работами сотрудников Аризонской национальной лаборатории S. Choi и J. Eastman, которые провели эксперименты с металлическими частицами нанометровых размеров [3]. Они

соединяли различные металлические наночастицы и наночастицы металлических окислов с различными жидкостями и по-

лучили очень интересные результаты. Эти суспензии наноструктурированных материалов были названы «наножидкостями».

Таблица 1

Сравнение коэффициентов теплопроводности материалов для наножидкостей

Материалы		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Углерод	Графен	~5000
	Алмаз	2300
	УНТ	~2000
	Графит	110–190
Металлические материалы	Серебро	429
	Медь	401
	Алюминий	237
Теплопроводящие жидкости	Вода	0.613
	Этиленгликоль	0.253
	Моторное масло	0.145

С целью разработки современных инновационных охлаждающих жидкостей для систем охлаждения высокофорсированных теплоэнергетических устройств нами были рассмотрены двухфазные системы, состоящие из базовой среды (вода, этиленгликоль, масла и др.) и наночастиц, т.е. частиц с характерными размерами от 1 до 100 нм. Важной особенностью наножидкостей является то, что даже при добавлении небольшого количества наночастиц они показывают серьезное повышение в теплопроводности (иногда более, чем в 10 раз). Причем повышение теплопроводности наножидкости зависит от температуры – с ростом температуры увеличивается повышение коэффициента теплопроводности.

При создании таких наножидкостей, представляющих собой двухфазную систему, необходим надежный и достаточно точный метод измерения коэффициента теплопроводности.

Нами рассмотрены разные методы измерения коэффициента теплопроводности для

жидкостей [1, 2, 4]. В результате проведенного анализа был выбран «3 ω -проводной» метод для измерения теплопроводности наножидкостей с достаточно высокой точностью [5].

«3 ω -проводной» метод используется для одновременного измерения теплопроводности и температуропроводности материалов. Он основан на измерении повышения температуры, зависящей от времени в источнике тепла, то есть горячем проводе, который погружен в жидкость для тестирования. Металлическая проволока одновременно служит электрическим нагревателем сопротивления и термометром сопротивления. Металлические проволоки изготавливаются крайне малыми в диаметре (несколько десятков мкм). Повышение температуры проволоки достигает обычно 10°C и влиянием конвекции при этом можно пренебречь.

Металлическая проволока длиной L и радиусом r , взвешенная в жидкости, действует как нагреватель и термометр сопротивления, как показано на рис. 1.

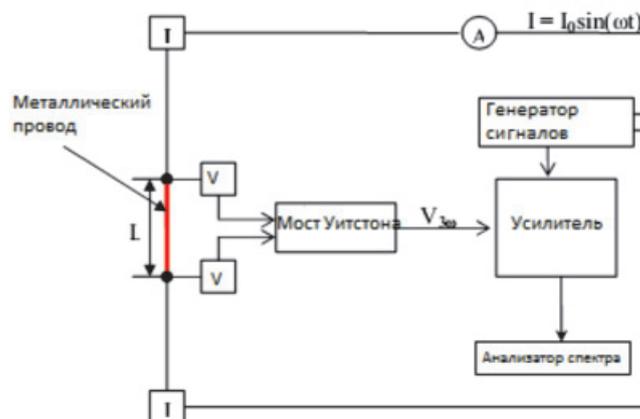


Рис. 1. Схема установки метода «3 ω горячей проволоки» для измерения теплопроводности жидкости

Сущность используемого метода определения коэффициента теплопроводности заключается в следующем. Переменный ток течет через металлический провод (нагреватель). Характеристика переменного тока определяется уравнением

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

где I_0 – является амплитудой переменного синусоидального тока; ω – частота тока; t – время.

$$P(t) = I_0^2 R_E \cos^2(\omega t) = \left(\frac{I_0^2 R_E}{2} \right)_{DC} + \left(\frac{I_0^2 R_E \cos(2\omega t)}{2} \right)_{2\omega}, \quad (3)$$

где R_E является электрическим сопротивлением металлической проволоки в условиях эксперимента, и оно является функцией температуры.

Выделившаяся тепловая мощность порождает изменение температуры в нагревателе, которое также является суперпозицией компоненты постоянного тока и компоненты переменного тока:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{DC} + \Delta T_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_E(t) &= R_{E0} \left\{ 1 + C_r \left[\Delta T_{DC} + \Delta T_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi) \right] \right\} = \\ &= R_{E0} (1 + C_r \Delta T_{DC})_{DC} + (R_{E0} C_r \Delta T_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi))_{2\omega}, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_r – температурный коэффициент сопротивления для металлического провода; R_{E0} – справочное сопротивление нагревателя при температуре T_0 .

$$\begin{aligned} V(t) = I(t)R_E(t) &= (I_0 R_{E0} (1 + C_r \Delta T_{DC}) \cos(\omega t))_{power} + \\ &+ \left(\frac{I_0 R_{E0} C_r \Delta T_{2\omega} \cos(3\omega t + \varphi)}{2} \right)_{3\omega} + \left(\frac{I_0 R_{E0} C_r \Delta T_{2\omega} \cos(\omega t + \varphi)}{2} \right)_{1\omega}. \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнении (6) напряжение на проводе содержит: падение напряжения из-за сопротивления постоянного тока провода при 1ω и два новых компонента, пропорциональные повышению температуры в проводе при 3ω и при 1ω . 3ω компонента напряже-

ния $V_{3\omega} = \left(\frac{I_0 R_{E0} C_r \Delta T_{2\omega} \cos(3\omega t + \varphi)}{2} \right)_{3\omega}$

может быть извлечена при помощи усили-

$$\Delta T_{2\omega} = \frac{P}{2\pi L k_f} \left[0,5 \ln \left(\frac{\alpha_f}{r^2} \right) - 0,5 \ln \omega + \eta \right] - i \left(\frac{P}{\pi L k_f} \right) = \frac{P}{\pi L k_f} f_{linear}(\ln \omega), \quad (8)$$

где α_f – коэффициент температуропроводности; k_f – коэффициент теплопроводности базовой жидкости; η – константа.

Переменный ток протекает через проволоку, действуя как нагреватель. В соответствии с законом Джоуля – Ленца определяется количество теплоты, выделяющееся при прохождении по проводнику электрического тока:

$$dQ = I^2 R dt \quad (2)$$

и представляет собой суперпозицию источника постоянного тока и 2ω модулированного источника тепла,

где ΔT_{DC} – амплитуда изменения температуры под действием постоянного тока; $\Delta T_{2\omega}$ – амплитуда изменения температуры под действием переменного тока; φ – сдвиг фазы, индуцированный нагревом массы образца.

Электрическое сопротивление провода зависит от температуры и это и есть 2ω компонент переменного тока в сопротивлении проволоки:

Обычно T_0 это температура объемного образца.

Напряжение на металлическом проводе может быть получено как,

теля, а затем используется для вывода амплитуды изменения температуры при 2ω :

$$\Delta T_{2\omega} = \frac{2V_{3\omega}}{I_0 R_{E0} C_r}. \quad (7)$$

Частотная зависимость изменения температуры $\Delta T_{2\omega}$ получена изменением частоты переменного тока при постоянном напряжении $V_{1\omega}$. В то же самое время зависимость изменения температуры $\Delta T_{2\omega}$ от частоты может быть аппроксимирована как

Изменение температуры при частоте 2ω в металлической проволоке может быть выведено при помощи компоненты напряже-

ния частоты 3ω , как показано в уравнении (8). Коэффициент теплопроводности жидкости k_f определяется по наклону 2ω изменения температуры металлической проволоки по отношению к частоте ω ,

$$k_f = -\frac{P}{4\pi L} \left(\frac{\partial T_{2\omega}}{\partial \ln \omega} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где P – применяемая мощность; ω – является частотой приложенного электрического тока; L – длина металлической проволоки; $\Delta T_{2\omega}$ – амплитуда изменения температуры на частоте 2ω в металлической проволоке.

3ω -проводной метод имеет несколько преимуществ перед традиционным методом горячего провода:

1) температурные колебания могут быть достаточно маленькими (ниже 1К, по сравнению с приблизительно 5К для метода горячей проволоки) в исследуемой жидкости, чтобы сохранить постоянные свойства жидкости;

2) фоновые шумы, такие как изменение температуры, имеют гораздо меньшее влияние на результаты измерений.

Эти преимущества делают этот метод идеально подходящим для измерения температурной зависимости коэффициента теплопроводности наножидкостей.

Установка для измерения коэффициента теплопроводности включает следующие компоненты: мост Уинстона; генератор сигналов; анализатор спектра; осциллограф.

Мост Уинстона представляет собой схему, применяемую для сравнения неизвестного сопротивления R_x с известным сопротивлением R_0 . Схема моста приведена на рис. 2. Четыре плеча моста Уинстона АВ, ВС, АД и DC представляют собой сопротивления R_x , R_0 , R_1 и R_2 соответственно. В диагональ ВД включается гальванометр, а в диагональ АС подсоединяется источник питания.

Если соответствующим образом подобрать величины переменных сопротивлений R_1 и R_2 , то можно добиться равенства потенциалов точек В и Д: $\varphi_B = \varphi_D$. В этом случае ток через гальванометр не пойдет, то есть $I_g = 0$. При этих условиях мост будет сбалансирован, и можно найти неизвестное сопротивление R_x . Для этого воспользуемся правилами Кирхгофа для разветвленных цепей. Применяя первое и второе правила Кирхгофа, получим

$$R_x = R_0 \cdot R_1 / R_2.$$

Точность в определении R_x указанным методом в большой степени зависит от выбора сопротивлений R_1 и R_2 . Наибольшая точность достигается при $R_1 \approx R_2$.

Генератор сигналов выступает в качестве источника электрических колебаний

в диапазоне 0,01 Гц – 2 МГц с высокой точностью (с дискретностью через 0,01 Гц). Марка генератора сигналов ГЗ-110.

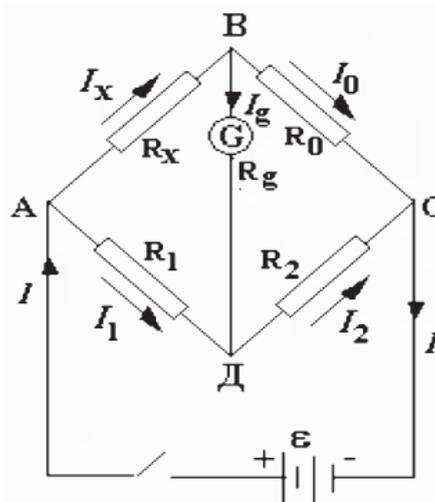


Рис. 2. Схема моста Уинстона

Анализатор спектра предназначен для выделения 3ω составляющей спектра. Перед началом работы анализатор спектра тестировался на соответствие величины напряжения третьей гармоники. Для этого на вход анализатора спектра подается сигнал с генератора ГЗ-110 и параллельно – на широкополосный цифровой вольтметр. Эффективное значение амплитуды напряжения сравнивалось на анализаторе спектра и вольтметре. Расхождение значений составило 2%. Калибровка анализатора спектра также выполнялась на внутреннем тесте прибора, на частоте 10 кГц. Величина сигнала на несущей частоте составила 80 мВ.

Осциллограф С1-114/1 предназначен для исследования формы электрических сигналов.

Перед началом исследования нагреватель (проволока) должен быть помещен в исследуемый образец жидкости. Проволока не должна касаться стенок сосуда. Далее производили сканирование по частоте в диапазоне от 100 до 1600 Гц. На анализаторе спектра при исследуемой частоте фиксируется величина сигнала 1, 2, 3 гармоники в автоматическом режиме.

Для измерения амплитуды силы тока использовали последовательно включенный в цепь резистор сопротивлением $\sim 0,47$ Ом. Величина должна быть такая, чтобы она не превышала номинал измерительного плеча порядка 1 Ом. С помощью осциллографа находили напряжение U . Зная R и U , находили амплитуду силы тока I_0 . Для расчета приложенной мощности измеряется напряжение в цепи.

Вначале исследуется широкий частотный диапазон. Определяется более узкая область частот, где линейность графика наиболее высока. Затем в выбранной области частот производится измерение с более мелким шагом частоты.

В табл. 2 представлены результаты измерения коэффициента теплопроводности наножидкости, представляющей собой 0,35% суспензию оксида графена в базовой жидкости (воде), с помощью медной изолированной проволоки длиной 19 см,

диаметром 100 мкм, при температуре 26 °С для частотного диапазона 780...840 Гц.

На рис. 3 приведен общий вид стенда для измерения коэффициента теплопроводности жидкости.

В табл. 3 представлена зависимость коэффициента теплопроводности суспензии оксида графена от его концентрации в жидкости при температуре 26 °С. Измерения коэффициентов теплопроводности наножидкости осуществлялись при различной концентрации оксида графена от 0 до 1,25%.

Таблица 2

Результаты измерения коэффициента теплопроводности наножидкости

Частотный диапазон	Круговая частота	Сила тока	Амплитуда напряжения третьей гармоники	Изменение температуры	Логарифм круговой частоты	Мощность	Наклон графика	Коэффициент теплопроводности
ν , Гц	ω , с ⁻¹	I_0 , А	$U_{3\omega}$, В	$\Delta T_{2\omega}$, К	$\ln(\omega)$, с ⁻¹	P , Вт	$T/\ln(\omega)$	k , Вт/м·К
780	4900,88	0,46	0,000044	0,138	8,50	0,28	-0,153	0,75
790	4963,72	0,46	0,000042	0,133	8,51	0,27	-0,153	0,74
800	5026,55	0,46	0,000041	0,131	8,52	0,26	-0,153	0,72
810	5089,38	0,45	0,000041	0,130	8,53	0,26	-0,153	0,71
820	5152,21	0,45	0,000040	0,128	8,55	0,25	-0,153	0,69
830	5215,04	0,45	0,000038	0,124	8,56	0,25	-0,153	0,68
840	5277,88	0,44	0,000038	0,123	8,57	0,25	-0,153	0,67



Рис. 3. Общий вид стенда для измерения коэффициента теплопроводности жидкости

В табл. 3 также приведены значения коэффициентов теплопроводности, определенные по формуле Максвелла.

$$\frac{k}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)}, \quad (10)$$

где k – коэффициент теплопроводности наножидкости; k_f – коэффициент теплопроводности базовой жидкости; k_p – коэффициент теплопроводности дисперсной фазы (наночастиц); φ – величина объемной фазы каждой из фаз дисперсий.

Таблица 3

Коэффициент теплопроводности суспензии оксида графена

Концентрация оксида графена $C, \%$	Измеренный коэффициент теплопроводности наножидкости $k_{\text{эксп}}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	Коэффициент теплопроводности наножидкости по Максвеллу $k_{\text{теор}}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	Отношение коэффициентов теплопроводности	
			$k_{\text{эксп}}/k_{\text{теор}}$	$k_{\text{эксп}}/k_{\text{табл. воды}}$
0,00	0,59	0,590	1,00000	1,00000
0,35	0,69	0,609	1,13300	1,16949
1,00	0,75	0,618	1,21359	1,27119
1,25	1,00	0,623	1,60514	1,69492

Отношение коэффициентов теплопроводности $k_{\text{эксп}}/k_{\text{теор}}$ и $k_{\text{эксп}}/k_{\text{табл. воды}}$ приведены на рис. 4.

Такие отклонения экспериментальных данных от предсказанных классическим Максвелловским уравнением, по нашему мнению, могут быть связаны с физическими механизмами увеличения теплопроводности наножидкости, а именно:

– за счет броуновского движения частиц; перемешивание жидкости создает

микро-конвективный эффект, тем самым повышая энергию теплопереноса;

– переносом тепла по механизму перколяции преимущественно вдоль кластерных каналов, образующихся в результате агломерации наночастиц, пронизывающих всю структуру растворителя (обычной жидкости);

– молекулы базовой жидкости образуют высоко ориентированные слои вокруг наночастиц, таким образом увеличивая объемную долю наночастиц.

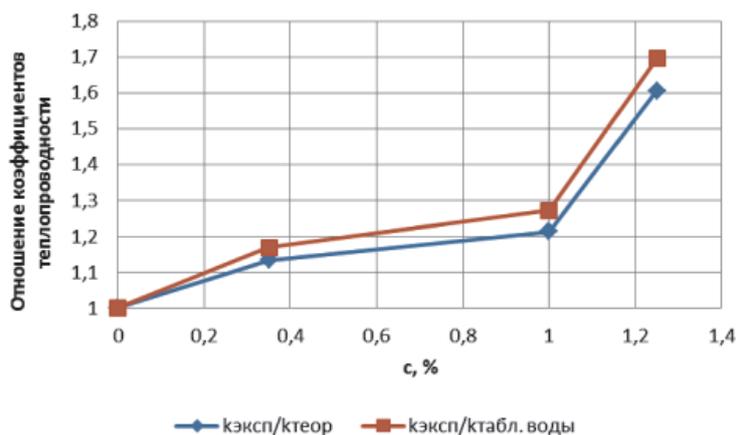


Рис. 4. Зависимость отношения коэффициентов теплопроводности от концентрации оксида графена

Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
- Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
- Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles / J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson Appl. Phys. Lett. 78,718; 2001.
- Thermal Conductivity Measurements Using the 3-Omega Technique: Application to Power Harvesting Microsystems / David de Koninck; Thesis of Master of Engineering, McGill University, Montréal, Canada, 2008. – 106 p.
- Thermal Conductivity Measurement / W.A. Wakeham, M.J. Assael 1999 by CRC Press LLC.

References

- Osipova V.A. *Eksperimentalnoe issledovanie protsessov teploobmena. Ucheb. posobie dlya vuzov. – 3-e izd., pererab. i dop.* (Pilot study of processes of heat exchange) Moscow: Energiya, 1979. 320 p.

2. *Teploperedacha / Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* (Heat transfer) Moscow: Energiya, 1975. 488 p.

3. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles / J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson Appl. Phys. Lett. 78,718; 2001.

4. Thermal Conductivity Measurements Using the 3-Omega Technique: Application to Power Harvesting Microsystems / David de Koninck; Thesis of Master of Engineering, McGill University, Montréal, Canada, 2008. 106 p.

5. Thermal Conductivity Measurement / W. A. Wakeham, M.J. Assael 1999 by CRC Press LLC.

Рецензенты:

Епархин О.М., д.т.н., профессор, директор Ярославского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль;

Амиров И.И., д.ф.-м.н., научный сотрудник Ярославского филиала ФГБУН «Физико-технологический институт» Российской академии наук, г. Ярославль.

Работа поступила в редакцию 28.07.2014.