

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Лабкович О.Н.¹, Чернобай В.А.

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь,
E-mail: olji@tut.by¹

Аннотация. В работе экспериментально показано, что образование структур из углеродных нанотрубок (УНТ) в магнитной жидкости в магнитном поле приводит к анизотропии физических свойств такой суспензии: вязкости и теплопроводности. Магнитное поле в этом случае является эффективным инструментом управления этими свойствами.

Ключевые слова: магнитная жидкость, многослойные углеродные нанотрубки, магнитное поле, кривые течения, динамический коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности.

ORIENTATION EFFECTS OF CARBON NANOTUBES IN A MAGNETIC FLUID IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Chernobai V.A., Labkovich O.N.¹

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
E-mail: olji@tut.by¹

Abstract. It has been shown experimentally that the formation of structures from carbon nanotubes (CNTS) in a magnetic fluid in a magnetic field leads to anisotropy of the physical properties of such a suspension: viscosity and thermal conductivity. The magnetic field in this case is an effective tool for controlling these properties.

Keywords: magnetic fluid, multilayer carbon nanotubes, magnetic field, flow curves, dynamic viscosity coefficient, thermal conductivity coefficient.

ЧЕРНОБАЙ Владимир Алексеевич. В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Тепловые и гидродинамические процессы в высокоскоростных магнитожидкостных уплотнениях, разработка их конструкций». Имеет более 130 научных публикаций, в том числе 22 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

ЛАБКОВИЧ Ольга Николаевна окончила Белорусский политехнический институт в 1991 году. Имеет более 30 научных публикаций, в том числе 4 статьи. В настоящее время является старшим преподавателем Белорусского национального технического университета.



Известно, что углеродные нанотрубки (УНТ) как однослойные (ОУНТ), так и многослойные (МУНТ) обладают уникальными физическими свойствами [1]: высокими значениями модуля Юнга, характеризующими прочностные и упругие свойства – 1–1,4 Т·Па (у стали 0,2 Т·Па), коэффициент теплопроводности (λ) вдоль трубки на порядок выше теплопроводности меди ~ 6000 Вт/(м·К).

В работах [2–4] показано, что введение в магнитный коллоид немагнитных ОУНТ позволило снизить трение при вихревом течение, улучшить теплообмен при ламинарном течении магнитной жидкости.

В работе экспериментально исследовано влияние процессов структурирования немагнитных углеродных нанотрубок в магнитной жидкости в магнитном поле на характер ее течения и коэффициент теплопроводности.

В экспериментах использовались суспензии МУНТ в магнитной жидкости типа магнетит-керосин с намагниченностью насыщения 52 кА/м, диаметр МУНТ соответствовал $70 \div 300$ нм, длина $0,01 \div 20$ мкм. На ротационном вискозиметре ХААКЕ с использованием измерительного узла с радиальным и периодическим по окружности магнитным полем (рис.1) исследовалось влияние добавок МУНТ на внутреннее трение. Магнитное поле измерялось в рабочем зазоре между цилиндрами датчиком Холла и микровеберметром Ф 190.

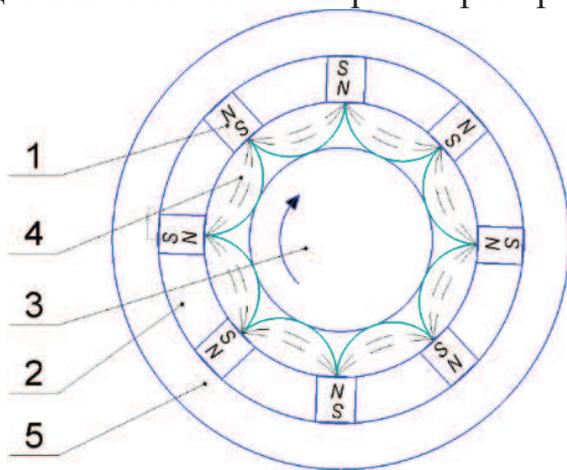


Рис. 1. Схема узла установки:

1 – постоянный магнит, 2 – наружный термостатируемый цилиндр, 3 – внутренний цилиндр, 4 – суспензия МУНТ, 5 – корпус

составляла 3 %. Для верхнего предела магнитного периодического поля ($H = 200$ кА/м) намагниченность магнитной жидкости МК – 52 (M) была близка к состоянию насыщения (M_s) – $M/M_s = 0,91$.

Для углеродных нанотрубок ОУНТ и МУНТ характерна высокая удельная поверхность ~ 600 м²/г [1]. Поэтому между ними существует

Радиальное магнитное поле изменялось в пределах $H = 0 \div 800$ кА/м, периодическое (рис.1) $H = 90 \div 200$ кА/м.

Однородность радиального магнитного поля в рабочем зазоре составило 2 %. Постоянная температура исследуемой суспензии поддерживалась прокачиванием термостатирующей жидкости через измерительный узел. Скорость сдвига изменялась в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 1000$ с⁻¹. Точность измерений напряжений сдвига

сильное Ван-дер-Ваальсовое притяжение, т.е. УНТ имеют значительную склонность к агрегации.

Получение устойчивой суспензии МУНТ в магнитной жидкости МК -52 включало в себя следующие этапы:

- выбор поверхностно-активного вещества (ПАВ);
- подбор оптимальной концентрации ПАВ для полного покрытия МУНТ;
- длительное диспергирование МУНТ в жидкость-носитель;
- центрифугирование суспензии при 6000 г для удаления конгломератов МУНТ.

Для получения информации о внутреннем трении в магнитной жидкости МК – 52 и суспензии МУНТ в МК – 52 на основании экспериментальных данных были построены кривые течения - зависимость напряжения τ от скорости сдвига γ (рис. 2).

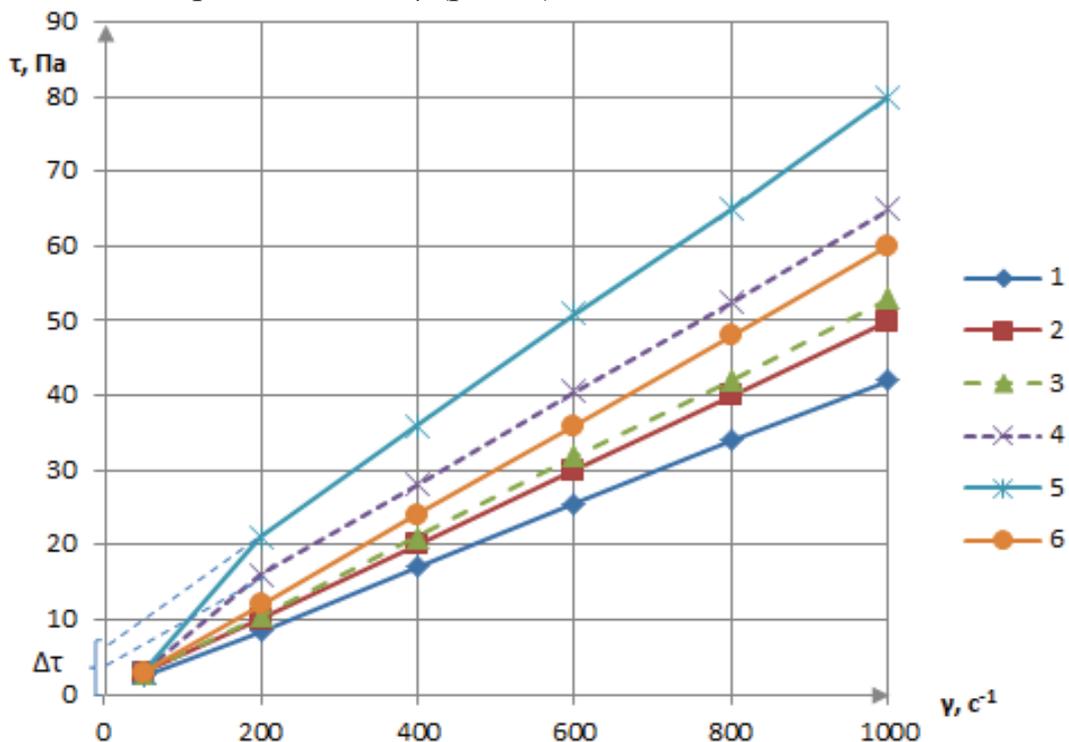


Рис. 2. Кривые течения: **1** – МК-52, $H = 0$; **2** – МК-52, $H = 1000$ кА/м, $\vec{H} \perp \vec{V}$; **3** – МК-52 + 2 % МУНТ, $H = 0$; **4** – МК-52 + 2 % МУНТ, $H = 200$ кА/м, $\vec{H} \perp \vec{V}$; **5** – МК-52 + 2 % МУНТ, $H = 1000$ кА/м, $\vec{H} \perp \vec{V}$; **6** – МК-52 + 2 % МУНТ, $H = 200$ кА/м, $\vec{H} \parallel \vec{V}$.

Как видно, для МК-52 они имели линейный характер (кривые 1, 2), т.е. течение МК – 52 в радиальном магнитном поле $0 \leq H \leq 800$ кА/м и скоростях сдвига $0 \div 1000$ с⁻¹ было ньютоновским, кривые течения для суспензии в магнитном поле имели нелинейный характер, свой-

ственный псевдопластичным жидкостям (рис. 2, кривые 4 - 5). Эффективная вязкость суспензии максимальна при небольших скоростях сдвига и снижается с увеличением скорости сдвига. Отрезок, отсекаемый прямой на оси напряжений $\Delta\tau$ является постоянной составляющей напряжений, которая обусловлена неньютоновскими свойствами суспензии в радиальном магнитном поле. Для периодического по окружности магнитного поля постоянная составляющего $\Delta\tau$ отсутствовала (рис. 2, кривая 6). При $H = 0$ течение суспензии было ньютоновским.

Для визуализации структур МУНТ в рабочем зазоре была изготовлена отдельная измерительная ячейка с дном из оргстекла, в которой к наружному цилиндру подводилось тепло до полного испарения жидкости керосина. Затем, с помощью электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN, получали фотографии структур МУНТ. Как видно из рис. 3 немагнитные МУНТ образуют структуры в магнитной жидкости, ориентированные вдоль магнитного поля: рис. 3, а – в радиальном магнитном поле, рис. 3, б – в тангенциальном (периодическом по окружности).

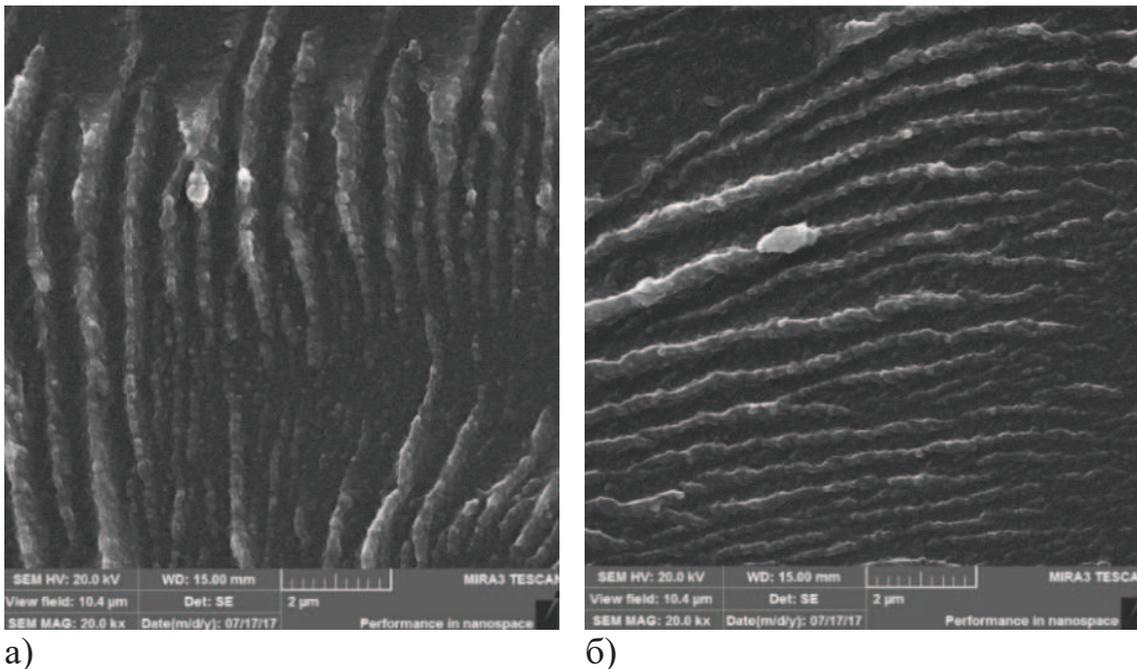


Рис. 3. Фотографии структур МУНТ: а – в радиальном магнитном поле, б – в тангенциальном (периодическом по окружности)

При вращении внутреннего цилиндра ($\gamma = 200 \text{ с}^{-1}$) ориентация тангенциальных структур не изменялась, а для радиально-ориентированных структур МУНТ наблюдались качественные изменения (рис. 4):

- происходил отрыв структур МУНТ от поверхностей цилиндров, образующих зазор;

- под воздействием сдвига структуры отклонялись на 45° , сохраняя расстояние между собой.

Будем рассматривать немагнитную структуру МУНТ как эллипсоид вращения. Известно, что в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле на такую структуру действует ориентирующий момент [5]:

$$Q_m = -(1/2)\mu_0 M^2 V_3 (1 - 3D) \sin \alpha \quad (1),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, V_3 – объем эллипсоида, D – размагничивающий фактор вдоль оси вращения, α – угол между осью вращения и магнитным полем. D уменьшается с ростом отношения большой и малой полуосей a/b и уже при $a/b = 10$ $D \approx 0$.

Поэтому, максимальный момент на эллипсоиде:

$$Q_m = \mu_0 M^2 V_3 (2)$$

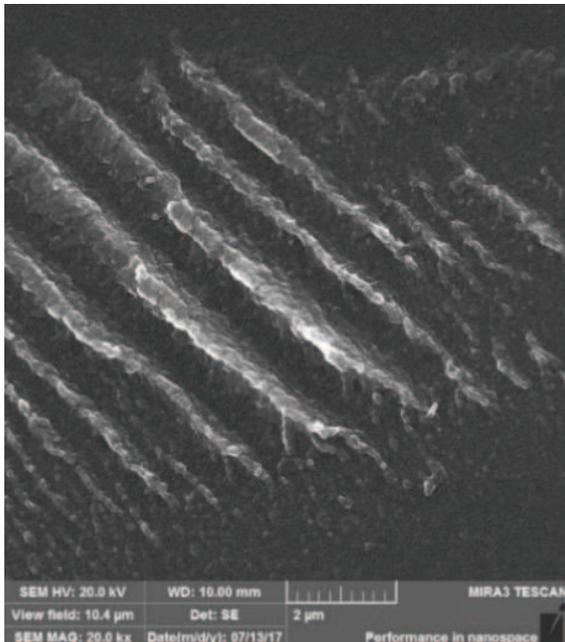


Рис. 4. Фотографии структур МУНТ

Другим механизмом, влияющим на характер течения суспензии МУНТ в магнитной жидкости, является адгезия между МУНТ и поверхностями цилиндров, а также между самими МУНТ. Экспериментально определенный оптимальный слой поверхностно-активного вещества (ПАВ) обеспечивал стабильность суспензии. Силы Ван-дер-Ваальса, возникающие между частицами, носят электростатический характер. Индуцируемые частицами заряды приводят к появлению

сил притяжения, энергия взаимодействия которых имеет вид [6]:

$$U_V = -\frac{A}{6} \left[\frac{2}{s^2-4} + \frac{2}{s^2} + \ln \frac{s^2-4}{s^2} \right] \quad (3),$$

где $S = 2x/d + 2$, d – диаметр частиц, x – расстояние между их поверхностями. Здесь A – постоянная Гамакера, которая зависит от свойств частиц и жидкости-носителя. Например, для частиц магнетита и керосина $A = (0,34 - 2,3) \cdot 10^{-19}$ Дж. Силы Ван-дер-Ваальса являются короткодействующими, т.е. их учет необходим при сближении частиц. В работе [7] экспериментально методом атомно-силовой микроскопии исследовалась адгезия вертикально ориентированных МУНТ к металлической подложке. Установлено, что сила отрыва F единичной МУНТ зависит от ее диаметра d и для $d = 70 \div 120$ нм F изменялась от 4 до 20 мН.

Для оценки адгезии МУНТ в условиях заводской лаборатории проводились испытания прочности связи стальных проволок диаметром 0,3 мм с резиной, в которую они запрессовывались. Радиально ориентированные МУНТ на поверхности проволок увеличили прочность связи с резиной на 15 % (с 365 Н до 421 Н). Таким образом, псевдопластичный характер течения суспензии МУНТ может определяться адгезионными связями радиально ориентированных структур МУНТ с поверхностями внутреннего и наружного цилиндров и последующим отрывом структур от поверхностей.

Для суспензии МУНТ концентрацией 2 % прирост вязких напряжений достигал 100 % при скоростях сдвига до $\gamma \leq 200 \text{ с}^{-1}$ и радиальных магнитных полях $H \geq 500 \text{ кА/м}$. С увеличением скорости сдвига эффект снижался и при $\gamma = 1000 \text{ с}^{-1}$ достигал 65 % (рис. 5, кривая 1), что связано с разворотом структур вдоль потока под действием гидродинамических сил и переходом поперечного обтекания структур в продольное.

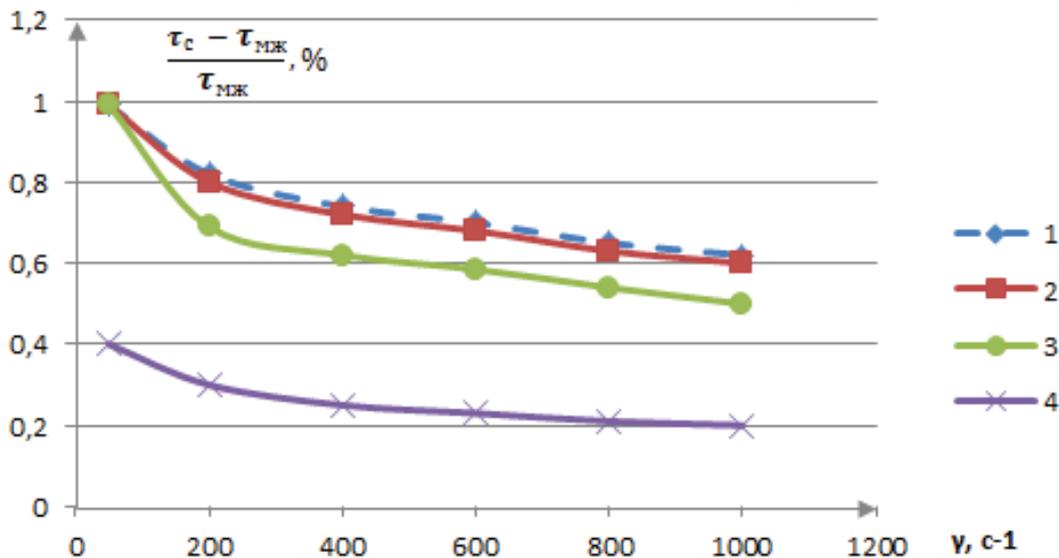


Рис.5. Влияние скорости сдвига на увеличение напряжений:

1 - $H = 1000 \text{ кА/м}$, $\vec{H} \perp \vec{V}$; 2 - $H = 500 \text{ кА/м}$, $\vec{H} \perp \vec{V}$;

3 - $H = 200 \text{ кА/м}$, $\vec{H} \perp \vec{V}$; 4 - $H = 200 \text{ кА/м}$, $\vec{H} \parallel \vec{V}$.

Для периодического по окружности магнитного поля увеличение касательных напряжений не превышало 40 % (рис. 5, кривая 2). Необходимо отметить, что в этом случае структуры МУНТ изначально были ориентированы вдоль потока.

При постоянной скорости сдвига увеличение магнитного поля приводило к росту касательных напряжений, кривые имели характер насыщения, характерный для намагниченности магнитной жидкости (рис. 6).

Полученные кривые качественно подтверждают оценку вклада немагнитных структур в вязкое трение в выражении (2). С уменьшением концентрации МУНТ (c) их вклад в трение снижался.

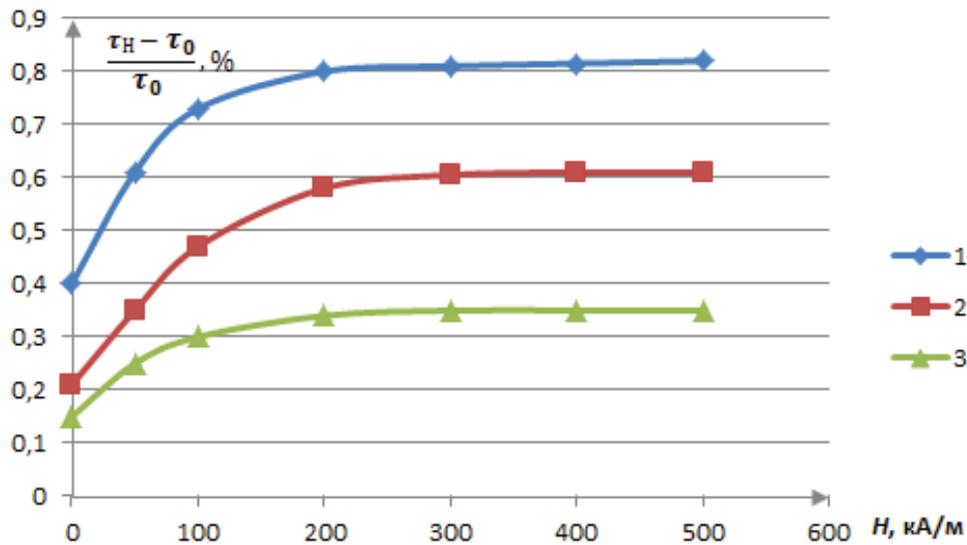


Рис. 6. Влияние магнитного поля на вязкое трение: 1 – $c = 2 \%$, $\gamma = 200 \text{ с}^{-1}$; 2 – $c = 1 \%$, $\gamma = 200 \text{ с}^{-1}$; 3 – $c = 0,5 \%$, $\gamma = 200 \text{ с}^{-1}$

Стационарным методом горизонтального плоского слоя исследовалось влияние структурирования МУНТ в магнитной жидкости на коэффициент теплопроводности суспензии λ_s . В отсутствие магнитного поля с увеличением концентрации МУНТ до 2% λ_s возрастал на 20%, при включении магнитного поля в направлении теплового потока вдоль поля наблюдалось увеличение λ_s на 45% (рис. 7).

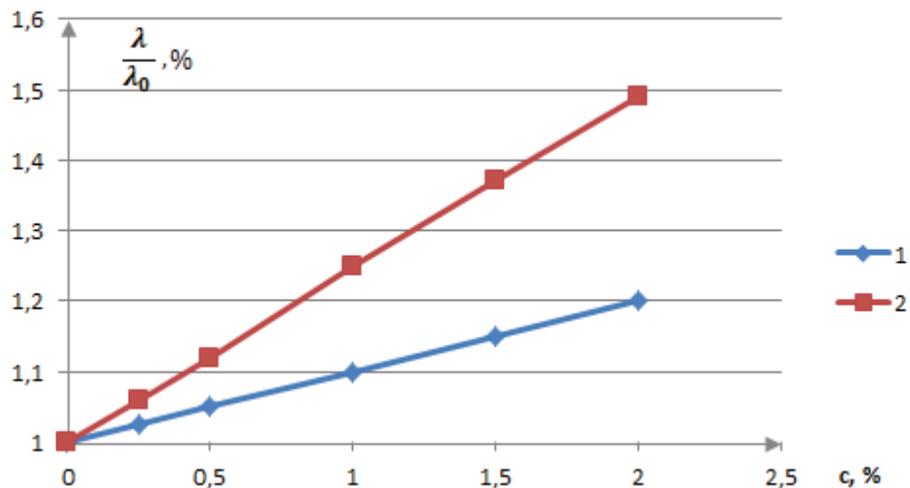


Рис. 7. Влияние структурирования МУНТ на коэффициент теплопроводности λ : 1 – $H = 0$; 2 – $H = 200 \text{ кА/м}$, $\vec{H} \parallel \text{grad } T$.

В диапазоне концентраций МУНТ $0 < c < 2 \%$ коэффициент теплопроводности суспензии во внешнем магнитном поле, совпадающим с направлением теплового потока ($\text{grad } T$) с точностью $\pm 6 \%$ описывается зависимостью:

$$\lambda_n/\lambda_0 = 1 + 4,4 c \quad (4)$$

Структуры МУНТ интенсифицировали перенос тепла вдоль своей оси. Таким образом, суспензии МУНТ в магнитной жидкости являются стабильной средой, в которой с помощью магнитного поля возможно управление трением и теплопереносом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века. // М.: Техносфера, 2003. – с. 336.
2. Лабкович О.Н. Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. т. 60, № 3 (2017). - с. 265 – 275.
3. Labkovich O.N., Reks A.G., Chernobai V.A. The friction control of magnetic fluid in the Couette flow. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials 431 (2017), - p. 91 93.
4. Лабкович О.Н., Рекс А.Г., Чернобай В.А. Теплообмен в куэттовском течении магнитной жидкости. // Сборник научных трудов 17-й Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, ИвГЭУ, 2016, ISBN 978-5-00062-192-9. – с. 342 - 347.
5. Кашевский Б.Э. О моменте сил, действующем на тело в намагничивающейся жидкости. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980, № 4.- с. 132 -136.
6. Овербек Дж. Взаимодействие между коллоидными частицами. – в кн. Наука о коллоидах/ под ред. Кройта Г.Р. // Москва, изд. Иностранная литература, 1955. - с. 342 – 389.
7. Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильина М.В., Ильин О.И., Смирнов В.А., Цуканова О.Г. Исследование адгезии вертикально ориентированных углеродных нанотрубок к подложке методом атомно-силовой микроскопии. // Физика твердого тела, 2016, т. 58, вып.2. – с. 301 – 306.