

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129

INFLUENCE OF THE MULTIGRAPHEN NANOPARTICLES CONCENTRATION IN THE HEAT CARRIER OF SHIP AND TRANSPORT PROPULSION PLANTS COOLING SYSTEMS ON ITS VISCOSITY

R. V. Gorshkov¹, A. V. Zharov¹, V. V. Skosar²

¹ — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

² — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

The possibility of using coolants modified with high-heat-conducting solid nanoparticles is being considered recently for the intensification of heat transfer in the cooling systems of forced ship and transport internal combustion engines. Modifying by such particles the basic heat carriers, such as water, and aqueous solutions of ethylene glycol, the stable two-phase suspensions are obtained, which have a higher thermal conductivity coefficient than base fluids. The well-known theoretical models describing the viscosity of "liquid-solid particles" suspensions are considered and it is shown that the addition of high-heat-conducting solid nanoparticles to the base heat carrier leads to its dynamic viscosity coefficient increase. The experimental studies of influence the concentration of multigraphene particles on the dynamic viscosity coefficient of suspensions at their different temperatures are carried out using a highly sensitive rheometer, in a measuring cell of which a construction with coaxially arranged cylinders with a double gap is realized. As a result, the relevant regularities are detected. Based on the obtained experimental data and well-known viscosity model, an equation for calculating the dynamic viscosity coefficient of the studied coolants samples at their different temperatures, depending on the mass concentration of multigraphene nanoparticles has been derived. The modification of base coolants with the properties of Newtonian fluid by multigraphene can lead to a change in the rheological behavior of the resulting suspension. The rheological studies on suspensions modified with multigraphene have been carried out and rheological curves of shear stress and dynamic viscosity coefficient versus shear rate have been obtained. As a result, it was established that the presented samples of suspensions are Newtonian liquids, therefore the corresponding hydrodynamic equations and equations characterizing a heat transfer at the "wall - cooling liquid" boundary are applied to describe the regularities of heat exchange processes with the presented liquids and the movement features of such suspensions in the cavities of the engine cooling system. Due to a significant increase in the dynamic viscosity coefficient of suspensions modified with multigraphene, we are tasked with detection the possibility of viscosity reducing of such heat carriers while keeping the effect of high thermal conductivity coefficient.

Keywords: heat transfer intensification, engine cooling system, coolant, multigraphene nanoparticles, dynamic viscosity coefficient, rheological studies.

For citation:

Gorshkov, Roman V., Aleksandr V. Zharov, and Vladimir V. Skosar. "Influence of the multigraphen nanoparticles concentration in the heat carrier of ship and transport propulsion plants cooling systems on its viscosity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 121–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129.

УДК 621.4:620.3

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ МУЛЬТИГРАФЕНА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ЕГО ВЯЗКОСТЬ

Р. В. Горшков¹, А. В. Жаров¹, В. В. Скосар²

¹ — Ярославский государственный технический университет,
Ярославль, Российская Федерация;

² — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Для интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения форсированных судовых и транспортных двигателей внутреннего сгорания в последнее время рассматривается возможность использования теплоносителей, модифицированных высокотеплопроводными твердыми наночастицами. Модифицируя частицами базовые теплоносители, такие как вода, водные растворы этиленгликоля, получают стабильные двухфазные суспензии, имеющие более высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с базовыми жидкостями. Рассмотрены известные теоретические модели, описывающие вязкость суспензий «жидкость – твердые частицы», и показано, что добавление высокотеплопроводных твердых наночастиц в базовый теплоноситель приводит к увеличению его коэффициента динамической вязкости. С использованием высокочувствительного реометра, в измерительной ячейке которого реализована конструкция с коаксиально расположеннымными цилиндрами с двойным зазором, проведены экспериментальные исследования влияния концентрации частиц мультиграфена на коэффициент динамической вязкости суспензий при их различных температурах, в результате чего выявлены соответствующие закономерности. На основе полученных экспериментальных данных и известной модели вязкости выведено уравнение по расчету коэффициента динамической вязкости исследованных образцов теплоносителей при разных их температурах в зависимости от массовой концентрации наночастиц мультиграфена. Модификация базовых теплоносителей со свойствами ньютоновской жидкости мультиграфеном может приводить к изменению реологического поведения получаемой суспензии. Проведены реологические исследования модифицированных мультиграфеном суспензий и получены реологические кривые, выражающие зависимость от скорости сдвига напряжения сдвига и коэффициента динамической вязкости. В результате установлено, что представленные образцы суспензий являются ньютоновскими жидкостями, поэтому для описания закономерностей процессов теплообмена с представленными жидкостями и особенностей движения таких суспензий в полостях системы охлаждения двигателя применимы соответствующие уравнения гидродинамики и уравнения, характеризующие теплообмен на границе «стенка – охлаждающая жидкость». Вследствие значительного увеличения коэффициента динамической вязкости суспензий, модифицированных мультиграфеном, поставлена задача выявить возможность снижения вязкости таких теплоносителей при сохранении эффекта повышенного коэффициента теплопроводности.

Ключевые слова: интенсификация теплоотдачи, система охлаждения двигателя, теплоноситель, наночастицы мультиграфена, коэффициент динамической вязкости, реологические исследования.

Для цитирования:

Горшков Р. В. Влияние концентрации наночастиц мультиграфена в теплоносителе систем охлаждения судовых и транспортных энергетических установок на его вязкость / Р. В. Горшков, А. В. Жаров, В. В. Скосарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 121–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-121-129.

Введение (Introductoin)

Форсирование транспортных и в том числе судовых двигателей внутреннего сгорания приводит к высоким температурам их теплонапряженных деталей, ограничивающих камеру сгорания. Методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения (СО) силовых установок как за счет конструктивных решений по оптимизации направлений потоков теплоносителя, так и за счет совершенствования режимных параметров движения охлаждающей жидкости, видимо, достигли своих максимальных возможностей. Поэтому важным способом влияния на теплоотдачу в СО является введение различных присадок в базовые охлаждающие жидкости (ОЖ), представляющие собой в основном водные растворы этиленгликоля [1]. Так, введением в ОЖ поверхностно-активных веществ и растворимых полимеров удалось изменить параметры пограничного слоя и уменьшить коэффициент динамической вязкости, что положительно сказалось на теплообменных процессах в СО двигателя [2]. В связи с этим перспективным, на наш взгляд, является создание устойчивых двухфазных суспензий на основе базовых ОЖ и твердых наночастиц с высоким коэффициентом теплопроводности.

С целью интенсификации теплоотдачи в системе охлаждения перспективных транспортных и судовых двигателей внутреннего сгорания создали теплоноситель с увеличенным на 60 % коэффициентом теплопроводности, представляющий собой устойчивую стабильную суспензию на основе водного раствора этиленгликоля и твердых наночастиц мультиграфена (МГ) с концентрациями от 0,2 до 0,75 % [3].

Известно, что добавление твердых частиц в базовые (несущие) жидкости приводит к увеличению коэффициента динамической вязкости суспензии, что оказывает влияние на толщину пограничного слоя и на интенсивность турбулентного смешивания в нем, а увеличение коэффициента динамической вязкости теплоносителя приводит, в свою очередь, к уменьшению интенсивности теплоотдачи в СО двигателей внутреннего сгорания. Согласно модели Альберта Эйнштейна (1) [4], увеличение массовой концентрации ϕ_m твердых частиц от 0,2 до 0,75 % приводит к двукратному увеличению коэффициента динамической вязкости суспензии η_{nf} :

$$\eta_{nf} = \eta_f (1 + k\phi), \quad (1)$$

где η_f — коэффициент динамической вязкости базовой жидкости; ϕ — объемная концентрация частиц; k — коэффициент, учитывающий форму частиц ($k = 2,5$ для сферических частиц).

Взаимосвязь массовой и объемной концентраций приведена в [3]. Уравнение (1) учитывает влияние частиц на гидродинамическое поле скоростей базовой жидкости и на тензор дополнительных напряжений. Позднее Х. Бринкман [5] модифицировал уравнение (1) для его использования при концентрациях частиц $\phi < 4\%$:

$$\eta_{nf} = \eta_f \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}}. \quad (2)$$

Такое же увеличение концентрации частиц, согласно уравнению (2), свидетельствует о повышении η_{nf} в семь раз.

Дж. Батчелор [6] предложил модель (3), учитывающую эффект броуновского движения частиц, для изотропных суспензий с твердыми частицами сферической формы:

$$\eta_{nf} = \eta_f (1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2). \quad (3)$$

Представленная модель свидетельствует о повышении η_{nf} суспензии в 3,5 раза при увеличении концентрации твердых частиц от 0,2 до 0,75 %. Таким образом, рассмотренные модели, описывающие вязкость суспензий «жидкость – твердые частицы», демонстрируют существенное изменение η_{nf} при одинаковом изменении концентрации частиц (рис. 1). При этом оказались различными виды функций, описывающие повышение вязкости суспензий при увеличении ϕ_m .

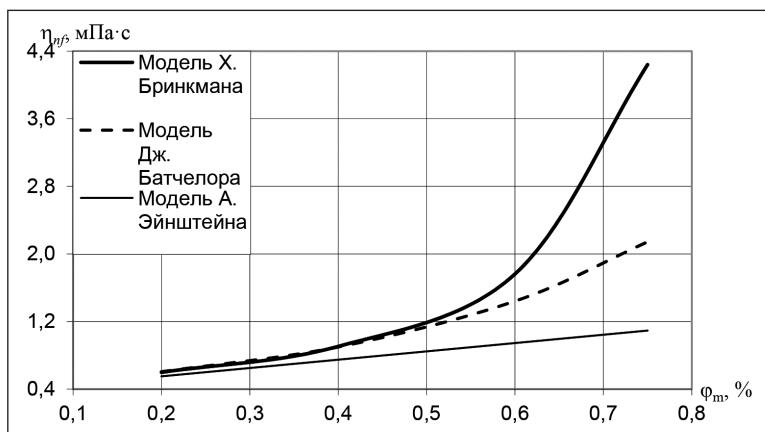


Рис. 1. Влияние концентрации твердых частиц в суспензии на коэффициент динамической вязкости по трем моделям при температуре 90 °C

Следует отметить, что полученные методом электрохимической эксфолиации частицы мультиграфена в данном случае представляют собой плоские высокотеплопроводные наночастицы, состоящие из нескольких слоев графена [7]. Исходя из ранее изложенного, важно отметить, что рассмотренные теоретические модели разрабатывались для частиц иной формы, и эти модели могут не учитывать различные факторы, влияющие на η_{nf} к которым относятся: размеры частиц [8], физические свойства базовой жидкости [9], [10], шероховатость краев частиц, удельная

площадь поверхности частиц, масса, плотность частиц и др. [11], [12]. Многие из этих факторов определяются технологией получения наночастиц, а также способом их диспергирования в базовых жидкостях [13]. Поэтому значения η_{nf} образцов наножидкостей с концентрацией частиц МГ от 0,2 до 0,75 % были определены в данном исследовании экспериментально.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для измерений η_{nf} указанных образцов суспензий использовался реометр Physica MCR-301, в измерительной ячейке которого реализована конструкция с коаксиально расположенными цилиндрами с двойным зазором в 0,42 и 0,46 мм. Исследуемый образец наножидкости помещался в измерительную ячейку, окруженную водой с постоянной температурой, и термостатировался с точностью до 0,1 °C. Реологические измерения проводились в диапазоне скоростей сдвига 0,1–450 с⁻¹. При этом задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра и измерялся момент сил, действующий на цилиндр, а далее определялось напряжение сдвига. Точность реометра проверялась путем измерений коэффициента динамической вязкости базовой жидкости и сравнивалась с данными источника [14]. Точность измерений момента сил составляет 0,5 %. Пределы относительной погрешности измерений коэффициента динамической вязкости данным прибором составляет ±2 %. Значения средних квадратичных отклонений при измерениях коэффициента динамической вязкости находились в пределах 3 % от измеряемых величин.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Влияние массовой концентрации наночастиц МГ на значения η_{nf} описываются квадратичной функцией (рис. 2). Аналогичную закономерность, подобно модели Дж. Батчелора (3), получили авторы работ [15], [16]. Увеличение концентрации частиц МГ от 0,2 до 0,75 % в базовой жидкости привело к увеличению ее коэффициента динамической вязкости на 45 % при температуре 90 °C.

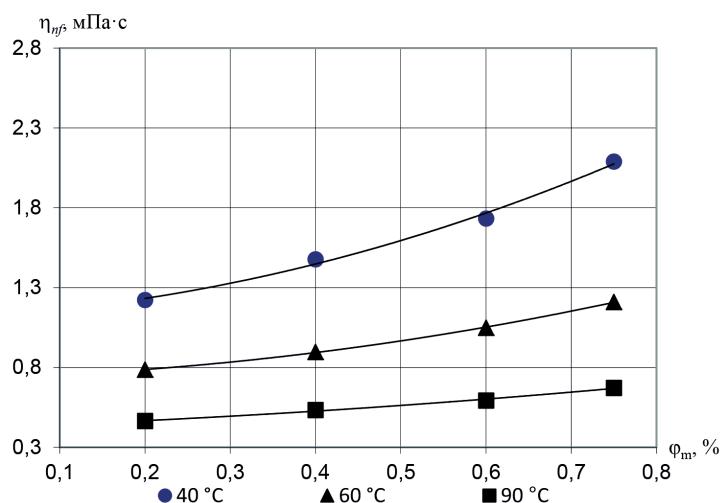


Рис. 2. Влияние массовой концентрации наночастиц мультиграфена на коэффициент динамической вязкости наножидкостей при различных температурах

Вязкость всех образцов суспензий, как и вязкость базовой жидкости, экспоненциально уменьшается с увеличением температуры испытаний охлаждающих жидкостей. Так, η_{nf} теплоносителя с массовой концентрацией частиц МГ 0,75 % уменьшился в 4,4 раза при увеличении температуры от 20 до 90 °C (рис. 3), что обусловлено ослаблением сил межмолекулярных и межчастичных адгезий. Такая тенденция наблюдается у большинства других исследователей, которые работали как с этиленгликолем [18], так и с его водными растворами [16], [17], [19]. Было установлено, что η_{nf} суспензии с концентрацией частиц МГ в 0,75 % увеличился на 49 % по сравнению с вязкостью базовой жидкости при ее температуре 90 °C.

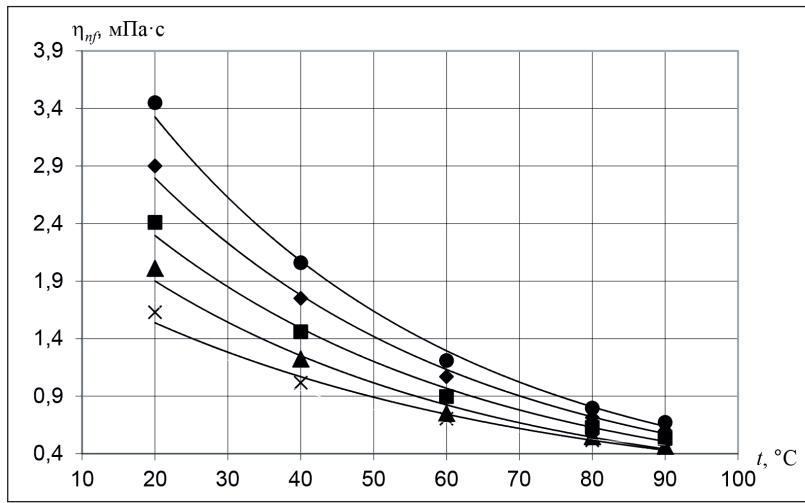


Рис. 3. Влияние концентрации частиц мультиграфена и температуры наножидкостей на их коэффициенты динамической вязкости:

● — $\varphi_m = 0,75\%$; ◆ — $\varphi_m = 0,6\%$; ■ — $\varphi_m = 0,4\%$; ▲ — $\varphi_m = 0,2\%$; × — ВЭГ

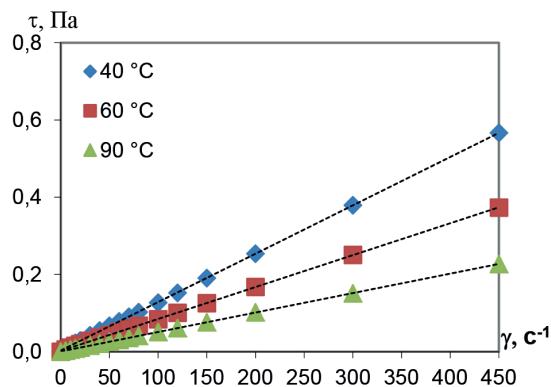
Если принять за основу известную и часто используемую модель Дж. Батчелора (3), то значения экспериментальных данных, согласно рис. 3, по коэффициенту динамической вязкости исследованных образцов наножидкостей при их разных температурах в зависимости от массовой концентрации наночастиц мультиграфена описываются уравнением (4):

$$\eta_{nf} = \eta_f (3,32 + 0,25\varphi_m + 1,25\varphi_m^2 - 0,0072T), \quad (4)$$

которое основано на аппроксимации экспериментальных данных (см. рис. 2 и 3) по методу наименьших квадратов с величиной коэффициента достоверности аппроксимации не ниже $R^2 = 0,992$, а именно справедливо в диапазоне $\varphi_m = 0,2 - 0,75\%$ и $T = 293 - 363$ К. Максимальное значение отклонения от экспериментальных данных составляет 5 %.

Известно, что модифицированная твердыми наночастицами базовая ньютоновская жидкость может обладать неニュтоновским поведением, т. е. вязкость такой жидкости будет проявлять зависимость от режима деформаций, а касательное напряжение сдвига может нелинейно зависеть от градиента скорости сдвига [18], [20]. Учитывая ранее изложенное, необходимо провести реологические исследования модифицированных мультиграфеном супензий. На вышеуказанном приборе были получены реологические кривые, выражающие зависимость от скорости сдвига напряжения сдвига (рис. 4) и коэффициента динамической вязкости (рис. 5).

а)



б)

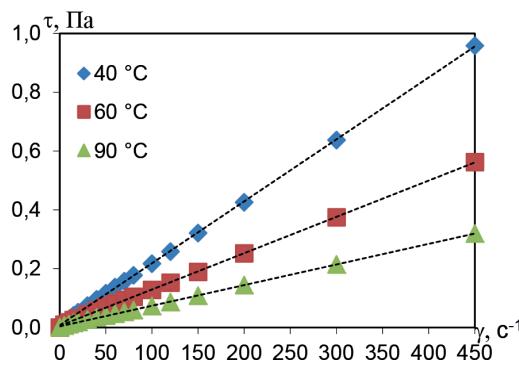
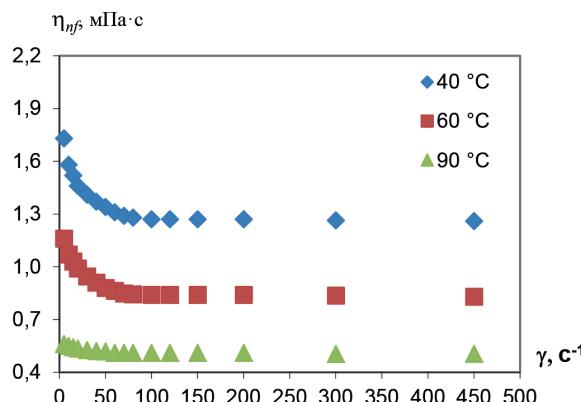


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига слоев наножидкостей при различных массовых концентрациях частиц мультиграфена и температурах:

а — $\varphi_m = 0,2\%$; б — $\varphi_m = 0,75\%$

а)



б)

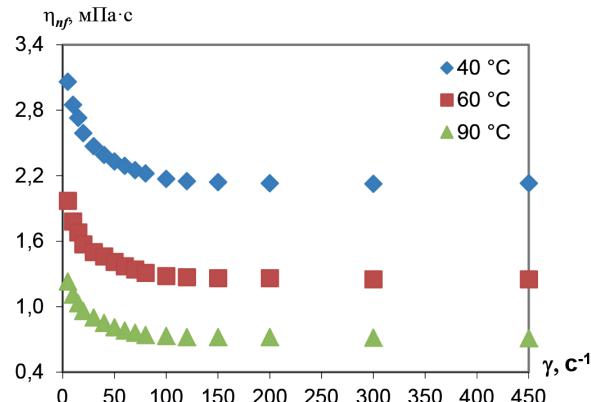


Рис. 5. Зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига слоев наножидкостей при различных массовых концентрациях частиц мультиграфена и температурах:

а — $\phi_m = 0,2\%$; б — $\phi_m = 0,75\%$

Для всех исследованных образцов наножидкостей наблюдается линейная зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига, причем все линии выходят из начала системы координат, как показано на рис. 4, откуда сделать вывод о том, что представленные образцы суспензий являются ньютоновскими жидкостями. Поэтому для описания закономерностей процессов теплообмена с представленными жидкостями и особенностей движения таких наножидкостей в полостях системы охлаждения двигателя применимы соответствующие уравнения гидродинамики и уравнения, характеризующие теплообмен на границе «стенка – охлаждающая жидкость».

Вязкость наножидкостей уменьшается с увеличением скорости сдвига до значений 60 и 80 s^{-1} , соответственно для образцов с массовой концентрацией частиц МГ $0,2$ и $0,75\%$ (см. рис. 5). Дальнейшее увеличение скорости сдвига не приводит к изменению коэффициента динамической вязкости образцов. Такое поведение суспензий можно объяснить двумя причинами. Во-первых, в начальный момент вращения шпинделя реометра при низких скоростях сдвига происходит разрушение крупных агломератов, что приводит к повышенным значениям напряжений сдвига. Во-вторых, в начале вращения шпинделя реометра при низких скоростях сдвига происходит реструктуризация плоских частиц мультиграфена и их ориентация в потоке жидкости [20].

Заключение (Conclusions)

Таким образом теплоноситель с концентрацией частиц мультиграфена в $0,75\%$ имеет, с одной стороны, увеличенный на 60% коэффициент теплопроводности, а с другой — увеличенный на 49% коэффициент динамической вязкости по сравнению с водным раствором этиленгликоля при температуре теплоносителя $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это приводит к уменьшению эффекта интенсификации теплоотдачи в системе охлаждения тепловых двигателей за счет повышенного коэффициента теплопроводности теплоносителя. Следовательно, необходимо выявить возможность снижения вязкости таких теплоносителей с сохранением эффекта увеличенного коэффициента теплопроводности.

Для практического использования жидкостей, содержащих наночастицы, в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания следует оценить устойчивость таких теплоносителей при контактах с применяемыми в двигателях конструкционными материалами.

Более широкое применение графеновых наночастиц с высоким коэффициентом теплопроводности в других эксплуатационных жидкостях силовых установок (например, в качестве присадок в моторные масла) позволит снизить температуры охлаждаемого им поршня с сохранением или даже уменьшением коэффициента трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Охлаждающие жидкости транспортных ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2009. — 263 с.
2. *Безюков О. К.* Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания: монография / О. К. Безюков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2015. — 272 с.
3. *Жаров А. В.* Теплоноситель с наночастицами мультиграфена для интенсификации процессов теплообмена в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания / А. В. Жаров, Р. В. Горшков, Н. Г. Савинский // Труды НАМИ. — 2018. — № 4 (275). — С. 48–56.
4. *Einstein A.* A new determination of molecular dimensions / A. Einstein // Annals of Physics. — 1906. — Vol. 9. — Pp. 289–306.
5. *Brinkman H. C.* The Viscosity of concentrated suspensions and solution / H. C. Brinkman // Journal of Chemical Physics. — 1952. — Vol. 20. — Is. 4. — Pp. 571. DOI: 10.1063/1.1700493.
6. *Batchelor G.K.* The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles / G.K. Batchelor // Journal of Fluid Mechanics. — 1977. — Vol. 83. — Is. 1. — Pp. 97–117. DOI: 10.1017/S0022112077001062.
7. *Shahil K. M. F.* Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials / K. M. F. Shahil, A. A. Balandin // Solid State Communications. — 2012. — Vol. 152. — Is. 15. — Pp. 1331–1340. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.04.034.
8. *Graham A. L.* On the viscosity of suspensions of solid spheres / A. L. Graham // Applied Scientific Research. — 1981. — Vol. 37. — Is. 3–4. — Pp. 275–286. DOI: 10.1007/BF00951252.
9. *Chen H.* Rheological behavior of ethylene glycol based titania nanofluids / H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan // Chemical Physics Letters. — 2007. — Vol. 444. — Is. 4–6. — Pp. 333–337. DOI: 10.1016/j.cplett.2007.07.046.
10. *Masoumi N.* A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids / N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2009. — Vol. 42. — Num. 5. — Pp. 055501. DOI: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.
11. *Yang L.* Viscosity prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types / L. Yang, K. Du, Y. H. Ding, B. Cheng, Y. J. Li // Powder Technology. — 2012. — Vol. 215. — Pp. 210–218. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.09.050.
12. *Рудяк В. Я.* Об эффективной вязкости наносуспензий / В. Я. Рудяк, А. А. Белкин, В. В. Егоров // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79. — № 8. — С. 18–25.
13. *Wang X.* Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture / X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. — 1999. — Vol. 13. — No. 4. — Pp. 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.
14. *Дымент О. Н.* Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена / О. Н. Дымент, К. С. Казанский, А. М. Мирошников. — М.: Химия, 1976. — 373 с.
15. *Sundar L. S.* Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review / L. S. Sundar, K.V. Sharma, M. T. Naik, M. K. Singh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2013. — Vol. 25. — Pp. 670–686. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.003.
16. *Kole M.* Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids / M. Kole, T. K. Dey // Journal of Applied Physics. — 2013. — Vol. 113. — Is. 8. — Pp. 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.
17. *Ijam A.* Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid / A. Ijam, R. Saidur, P. Ganesan, A. M. Golsheikh // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 87. — Pp. 92–103. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060.
18. *Hadadian M.* Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids / M. Hadadian, E. K. Goharshadi, A. Youssefi // Journal of nanoparticle Research. — 2014. — Vol. 16. — №. 12. — Pp. 2788. DOI: 10.1007/s11051-014-2788-1.
19. *Amiri A.* Backward-facing step heat transfer of the turbulent regime for functionalized graphene nano-platelets based water–ethylene glycol nanofluids / A. Amiri, H. K. Arzani, S.N. Kazi, B.T. Chew, A. Badarudin // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 97. — Pp. 538–546. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.042.
20. *Mehrali M.* Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets / M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, S. T. Latibari, S. N. Kazi, M. Mehrali, M. N. B. M. Zubir, H. S. C. Metselaar // Nanoscale Research Letters. — 2014. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 15. DOI: 10.1186/1556-276X-9-15.

REFERENCES

1. Bezyukov, O. K., and V. A. Zhukov. *Okhlagzhayushchie zhidkosti transportnykh DVS*. SPb.: SPGUVK, 2009.
2. Bezyukov, O. K. *Okhlagzhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: monografiya*. SPb.: GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2015.
3. Zharov, A. V., R. V. Gorshkov, and N. G. Savinskiy. "Heat carrier with multigrafen nanoparticles to process heat exchange intensification in internal combustion engines cooling systems." *Trudy NAMI* 4(275) (2018): 48–56.
4. Einstein, A. "A new determination of molecular dimensions." *Annals of Physics* 9 (1906): 289–306.
5. Brinkman, H. C. "The viscosity of concentrated suspensions and solutions." *The Journal of Chemical Physics* 20.4 (1952): 571. DOI: 10.1063/1.1700493.
6. Batchelor, G. K. "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles." *Journal of fluid mechanics* 83.1 (1977): 97–117. DOI: 10.1017/S0022112077001062.
7. Shahil, Khan MF, and Alexander A. Balandin. "Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials." *Solid State Communications* 152.15 (2012): 1331–1340. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.04.034.
8. Graham, Alan L. "On the viscosity of suspensions of solid spheres." *Applied Scientific Research* 37.3–4 (1981): 275–286. DOI: 10.1007/BF00951252.
9. Chen, Haisheng, Yulong Ding, Yurong He, and Chunqing Tan. "Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids." *Chemical physics letters* 444.4–6 (2007): 333–337. DOI: 10.1016/j.cplett.2007.07.046.
10. Masoumi, N., N. Sohrabi, and A. Behzadmehr. "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.5 (2009): 055501. DOI: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.
11. Yang, Liu, Kai Du, Yue Hong Ding, Bo Cheng, and Yan Jun Li. "Viscosity-prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types." *Powder technology* 215–216 (2012): 210–218. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.09.050.
12. Rudyak, V. Y., A. A. Belkin, and V. V. Egorov. "On the effective viscosity of nanosuspensions." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 54.8 (2009): 1102–1109. DOI: 10.1134/S1063784209080039.
13. Wang, Xinwei, Xianfan Xu, and Stephen U. S. Choi. "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture." *Journal of thermophysics and heat transfer* 13.4 (1999): 474–480. DOI: 10.2514/2.6486.
14. Dyment, O. N., K. S. Kazanskii, and A.M. Miroshnikov. *Glikoli i drugie proizvodnye okisei etilena i propilena*. M: Khimiya, 1976.
15. Sundar, L. Syam, K. V. Sharma, M. T. Naik, and Manoj K. Singh. "Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review." *Renewable and sustainable energy reviews* 25 (2013): 670–686. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.003.
16. Kole, Madhusree, and T. K. Dey. "Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids." *Journal of Applied Physics* 113.8 (2013): 084307. DOI: 10.1063/1.4793581.
17. Ijam, Ali, R. Saidur, P. Ganesan, and A. Moradi Golsheikh. "Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 87 (2015): 92–103. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.060.
18. Hadadian, Mahboobeh, Elaheh K. Goharshadi, and Abbas Youssefi. "Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids." *Journal of nanoparticle Research* 16.12 (2014): 2788. DOI: 10.1007/s11051-014-2788-1.
19. Amiri, Ahmad, Hamed Khajeh Arzani, S.N. Kazi, B.T. Chew, and A. Badarudin. "Backward-facing step heat transfer of the turbulent regime for functionalized graphene nanoplatelets based water–ethylene glycol nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 97 (2016): 538–546. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.042.
20. Mehrali, Mohammad, Emad Sadeghinezhad, Sara Tahan Latibari, Salim Newaz Kazi, Mehdi Mehrali, Mohd Nashrul Bin Mohd Zubir, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. "Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets." *Nanoscale research letters* 9.1 (2014): 15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горшков Роман Владимирович — аспирант
Научный руководитель:
Жаров Александр Викторович
Ярославский государственный технический
университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль,
Московский проспект, 88
e-mail: RZiori@yandex.ru

Жаров Александр Викторович —
кандидат технических наук, профессор
Ярославский государственный технический
университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль,
Московский проспект, 88
e-mail: zharov3@yandex.ru

Скосарь Владимир Васильевич — аспирант
Научный руководитель:
Кошурников Андрей Викторович —
кандидат геолого-минералогических наук,
Московский государственный университет им.
М. В. Ломоносова
119992, Российская Федерация, г. Москва,
Ленинские горы, 1
e-mail: skosar@msu-geophysics.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorshkov, Roman V. — Postgraduate
Supervisor:
Zharov, Aleksandr V.
Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: RZiori@yandex.ru

Zharov, Aleksandr V. —
PhD, professor
Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: zharov3@yandex.ru

Skosar, Vladimir V. — Postgraduate
Supervisor:
Koshurnikov Andrej Viktorovich —
PhD,
Leading Researcher MSU
Lomonosov Moscow State University
1, Lenin's mountains, Moscow, 119992,
Russian Federation
e-mail: skosar@msu-geophysics.ru

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.
Received: December 27, 2018.