

Фарид Канафиевич ШАБИЕВ¹
Юрий Вавилович ПАХАРУКОВ²
Руслан Фаридович САФАРГАЛИЕВ³
Борис Семёнович ЕЗДИН⁴
Сергей Александрович ВАСИЛЬЕВ⁵

УДК 532.2, 621.6

СНИЖЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕФТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ ГРАФЕНОВЫХ НАНОПЛАСТИНОК*

- ¹ кандидат физико-математических наук, доцент,
Тюменский государственный университет;
Тюменский индустриальный университет
faridshab@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0551-3836
- ² доктор физико-математических наук, профессор,
Тюменский государственный университет;
Тюменский индустриальный университет
pacharukovyu@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3937-4937
- ³ старший преподаватель, Тюменский государственный университет;
ассистент, Тюменский индустриальный университет
ruslan.safargaliev@mail.ru; ORCID: 0000-0002-4799-8651
- ⁴ кандидат физико-математических наук, доцент,
Новосибирский государственный университет
bse@nsu.ru; ORCID: 0000-0003-4563-9265
- ⁵ ведущий инженер прикладной физики физического факультета НГУ,
Новосибирский государственный университет
svasiljev@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0076-9445

* Реологические исследования нефти произведены в Испытательной лаборатории буровых и тампонажных растворов Центра перспективных исследований и инновационных разработок Тюменского индустриального университета.

Цитирование: Шабиев Ф. К. Снижение вязкости нефти с добавлением графеновых нанопластинок / Ф. К. Шабиев, Ю. В. Пахаруков, Р. Ф. Сафаргалиев, Б. С. Ездин, С. А. Васильев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 3 (31). С. 106-125.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125

Аннотация

Понимание механизмов взаимодействия между графеновыми наночастицами (ГН) и молекулами нефти имеет решающее значение для успешного извлечения нефти. Многочисленные исследования показали, что наножидкости, а в особенности нанофлюиды (НФ) из семейства графеновых (ГНФ), являются подходящими кандидатами для повышения нефтеотдачи высокообводенных продуктивных пластов. Повышение нефтеотдачи при закачке нанофлюидов объясняется изменением смачиваемости, снижением межфазного натяжения и изменением вязкости. Поэтому знание механизмов, влияющих на вязкость ГНФ является актуальной задачей современной науки, как фундаментальной, так и прикладной.

В работе было проведено комплексное исследование молекулярного взаимодействия графеновых наночастиц и углеводородных молекул нефти с целью понять механизмы, влияющие на вязкость наножидкостей. В статье представлены результаты исследования реологических свойств нефти с различным содержанием в ней графеновых наночастиц. При низких концентрациях графеновых наночастиц наблюдается снижение динамической вязкости базовой жидкости на 10%-17%. Показано, что на относительную вязкость влияет не только концентрация, но и температура. Так, для массовой доли графеновых наночастиц $0,5 \times 10^{-3}\%$ и температуры $50\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается максимальное снижение вязкости, равное 17%. При увеличении массовой доли графеновых наночастиц от $5 \times 10^{-3}\%$ и более нефть проявляет реологические свойства наножидкости. На основе данных, полученных с помощью компьютерного моделирования и прямого наблюдения за самосборкой графеновых наночастиц и молекул углеводородов нефти, предложен механизм, объясняющий причину снижения вязкости наножидкости при низких концентрациях наночастиц. Также было показано, что такое поведение наножидкости возможно, в основном, для углеводородных жидкостей в качестве базовой жидкости и планарных графеновых наночастиц.

Ключевые слова

Графен, нанофлюиды на основе графена, вязкость нанофлюидов, вязкость нефти.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125

Введение

Вязкость является очень важным параметром, определяющим физические свойства нанофлюидов (НФ), такие как теплоемкость, теплопроводность [14, 25]. Нанофлюиды из семейства графеновых (ГНФ) являются перспективными по сравнению с НФ на основе металлов и оксидов металлов. Так в обзорах [10, 11, 17, 31] подробно приводится описание новых перспективных материалов ГНФ, широко применяющихся в различных отраслях промышленности от энергетической до пищевой. К настоящему времени достигнуты большие успехи в использовании ГНФ в нефтяных технологиях [4, 16, 20, 30, 34].

Нефть относится к неньютоновской жидкости, т. к. в зависимости от содержания и видов углеводов ее вязкость зависит от скорости деформации сдвига [24]. Такая зависимость является следствием возникновения в ней структурированных состояний, образованных с участием коллоидных частиц (нефтяные дисперсные частицы) [3, 6-8]. Проявление структурирования нефти приводит к возрастанию гидросопротивления, что снижает нефтеотдачу пласта и увеличивает обводнение добывающих скважин. Во многом эти процессы определяются вязкостью нефти [9]. Так как графеновые частицы в составе ГНФ при взаимодействии с углеводородами [28] проникают в нефть, делая ее саму нанофлюидом то, выявление механизмов влияния частиц на вязкость нефти, является ключом к решению выше означенных проблем.

Из литературы известно, что вязкость непосредственно обуславливается процессами переноса. Следовательно, процессы переноса импульса и выравнивание флуктуаций плотности в НФ будут определять вязкость. Механизмы влияния на вязкость НФ оказываются связанными с взаимодействием наночастиц и молекулами несущей жидкости [33]. Коэффициент вязкости нанофлюидов хорошо описывается квадратичной функцией:

$$\eta = \eta_0(1 + k_1\varphi + k_2\varphi^2) \quad (1)$$

Функциональная зависимость (1), не является универсальной, коэффициенты k_1 , k_2 являются функциями плотности базового флюида, отношения масс и характерных размеров наночастиц и молекул [32]. Поэтому существует огромное множество экспериментальных корреляционных функций, описывающих вязкость нанофлюидов, от концентрации наночастиц [21, 25, 32, 33].

В настоящее время идет накопление экспериментального и теоретического материала, в котором выявляются новые физические свойства жидкостей с добавлением наночастиц графена [10, 11, 17, 25, 31]. Результаты исследований носят противоречивый характер. С одной стороны, многочисленные исследования показывают, что добавление наночастиц металлов, оксидов металлов и других наночастиц приводит к росту вязкости жидкости (с ростом концентрации наночастиц) [21, 25]. С другой стороны, в некоторых работах [12, 23, 26, 29] было показано, что добавление наночастиц графена уменьшает вязкость базового флюида.

В данной статье приведены результаты экспериментального исследования вязкости нефти с добавлением графеновых наночастиц при разных температурах и концентрациях. Данные экспериментов позволяют выявить механизм снижения вязкости, что помогает разрешить вышеуказанное противоречие.

Методы

В качестве исходных материалов использовались: обезвоженная и дегазированная нефть месторождения Западной Сибири плотностью $\rho = 838 \text{ кг/м}^3$, и наночастицы многослойного графена (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия). В работе использован углеродный материал (графеновые наночастицы), не содержащий в составе поверхностно-активных веществ и посторонних примесей.

Графеновый нанофлюид был синтезирован методом ультразвукового диспергирования исходного графенового материала в нефти на протяжении 5 мин. Для исключения возгонки нефти при ультразвуковом диспергировании, в системе поддерживалась постоянная температура. Распределение наночастиц углерода по размерам в НФ определяли методом динамического рассеяния света (ДРС) с помощью прибора NANOTRAC Wave II Zeta (Microtrac MRB). Измерения проводили при рассеянии лазерного излучения на угол 180° в полистирольной кювете. Длина волны лазера 780 нм, температура измерений 24°C . Для получения распределений по размерам использовалось программное обеспечение Nano Wave. Размер частиц был рассчитан как среднее из 5 измерений. Время одного измерения 120 с.

В работе выполнен комплекс лабораторных исследований по выявлению зависимости изменения динамической вязкости нефти от концентрации графеновых наночастиц в широком температурном диапазоне. Для этих целей был использован синусоидальный вибровискозиметр серии SV10 (A&D), который разработан для точного измерения вязкости в широком динамическом диапазоне и при высоком разрешении.

Таблица 1

Параметры образцов

Table 1

Sample parameters

Характеристика исследуемых образцов	
№	wt (%) $\times 10^{-3}$
1	0 (base fluid)
2	0.10
3	0.50
3	0.75
5	1.00
6	5.00
7	10.00
8	20.00
9	30.00

Всего подготовлено 8 комбинированных образцов нефти с добавлением различной концентрации графеновых наночастиц (таблица 1). Подготовленные образцы помещались в измерительную ячейку вискозиметра, сразу после диспергирования, для исключения седиментации и осаждения графеновых наночастиц, далее осуществлялась непрерывная запись вязкости в процессе повышения температуры исследуемого образца в диапазоне от 20°C до 80°C .

Измерения вязкости НФ были продублированы с использованием ротационного вискозиметра OFITE 900 по стандартной методике реологических испытаний нефти при температурах 20°C , 40°C , 60°C и 80°C .

Для понимания механизмов взаимодействия молекул углеводородов нефти и графеновых наночастиц в работе проведен комплекс квантово-химических и молекулярно-динамических исследований. Моделирование взаимодействия углеводородных молекул со слоями графена были выполнены в несколько этапов. На начальном этапе были смоделированы структуры углеводородных молекул и графена методом *ab initio* с использованием базиса одноэлектронных волновых функций STO6-31G [15, 22]. На следующем этапе результаты моделирования были использованы для определения взаимодействия углеводородных молекул с графеном. Расчеты взаимодействия были выполнены методом атомного потенциала. При этом предполагалось, что взаимодействие осуществляется только посредством сил Ван-дер-Ваальса и не приводит к искажению молекул углеводородов и графена. Для определения энергии Ван-дер-Ваальсового взаимодействия между молекулами углеводородов и графена был выбран потенциал Букингема:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (-A \cdot r_{ij}^{-6} + B \cdot \exp(-\alpha \cdot r_{ij})), \quad (2)$$

где r_{ij} — расстояния между каждым i -м атомом одногослоя графена и каждым j -м атомом углеводородной молекулы; N_1 и N_2 — число атомов в графене и углеводородной молекуле соответственно; A, B, α — коэффициенты, найденные по экспериментально измеренным значениям энергий Ван-дер-Ваальсовых связей в различных соединениях [2]. Далее вычислялась удельная энергия взаимодействия, приходящаяся на один атом углеводородной молекулы: $E = \frac{\varepsilon}{N}$.

Во всех случаях графеновый лист был круглой формы в центре, которого на некотором расстоянии от плоскости помещалась исследуемая молекула или молекулы. Диаметр графенового листа выбирался таким образом, чтобы удельная энергия взаимодействия графена и молекулы углеводорода отличалась менее чем на 0,01%, от максимально удаленных атомов водорода.

Энергия взаимодействия углеводородной молекулы и графена рассчитывалась для различных расположений относительно слоя графена, которые включали в себя линейные сдвиги и углы поворота молекулы относительно продольной и перпендикулярной осей к плоскости графена. Расчеты проводились как для одиночной молекулы, так и для группы молекул от 2 до 16. По результатам расчетов были построены энергетические картины, по которым определялось наиболее выгодное положение молекулы относительно слоя графена.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным ДРС в НФ присутствует частицы с размерами от 60 nm до 500 nm, максимум функции распределения приходится на частицы 97.8 nm (рис. 1а вставка). Типичные форма и размер частиц приведены на рис. 1а, 1б. На рис. 1а наблюдается однородность наночастиц по размерам. Частицы преимущественно имеют треугольную форму (рис. 1б).

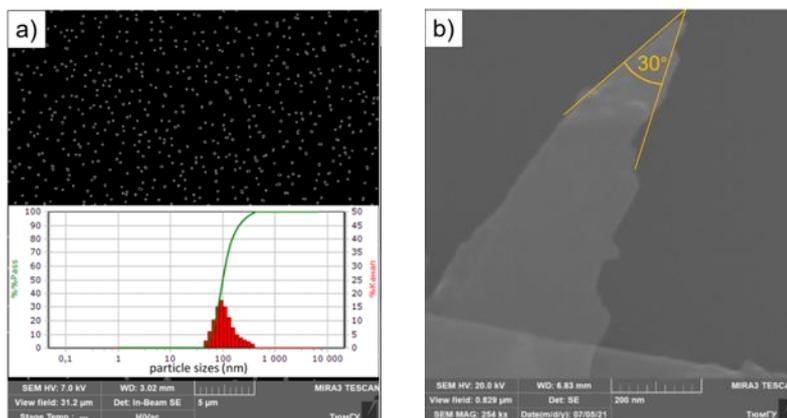


Рис. 1. а) изображение графеновых наночастиц на кремневой подложке, полученное методом SEM (на вставке распределение наночастиц графена по размерам); б) SEM изображение формы наночастицы графена

Fig. 1. (a) SEM image of graphene nanoparticles on a silicon substrate (graphene nanoparticle size distribution inset); (b) SEM image of graphene nanoparticle shape

Полученные результаты измерения коэффициента динамической вязкости представлены на рис. 2.

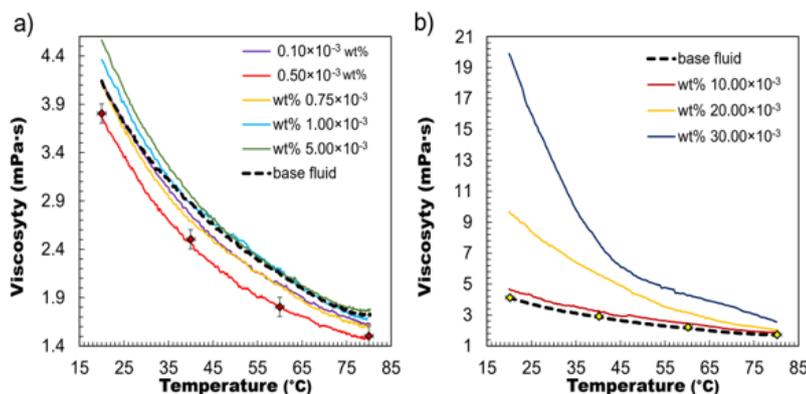


Рис. 2. Температурная зависимость динамической вязкости нефти при различных концентрациях графеновых наночастиц: а) при малых концентрация (красными ромбами маркированы данные, полученные с ротационного вискозиметра); б) при больших концентрация (желтыми ромбами маркированы данные, полученные с ротационного вискозиметра)

Fig. 2. Temperature dependence of the dynamic viscosity of oil at different concentrations of graphene nanoparticles: a) at low concentrations (red rhombuses mark the data obtained from the rotary viscometer); b) at high concentrations (yellow rhombuses mark the data obtained from the rotary viscometer)

По данным измерения вязкости видно, что для НФ, с концентрацией $0.5 \times 10^{-3}\%$, происходит ее снижение с $4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ до $3.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ($\sim 10\%$) (рис. 2а) при температуре 25°C . При дальнейшем повышении температуры вязкость данного образца так же ниже вязкости чистой нефти без добавок.

В то же время, при повышении концентрации до $10 \times 10^{-3}\%$, отмечается повышение динамической вязкости: чем выше концентрация наночастиц в нефти, тем выше значение динамической вязкости НФ (рис. 2б).

Результат расчета удельной энергии взаимодействия молекул углеводородов и графена приведены в таблице 2.

Таблица 2

Удельные энергии Ван-дер-Ваальсового взаимодействия молекул углеводородов с графеном

Table 2

Specific Van der Waals energies of hydrocarbon molecules interacting with graphene

	н-октан C_8H_{18}	н-тетрако- зан $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$	н-триакон- тана $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$	графен
Удельная энергия E, kJ/mol Для одиночной молекулы горизонтальная ориентация	- 6.446	- 6.408	- 6.386 - 6.386 [5]	- 4.516 - 4.384 [13] - 4.143 [18] - 4.431 [1]
Удельная энергия E, kJ/mol Для одиночной молекулы вертикальная ориентация	- 4.251	- 4.251	- 4.251	-
Удельная энергия E, kJ/mol Для домена из 16 молекул вертикальная ориентация	- 6.746	- 10.730	- 12.546	-

Компьютерное моделирование показывает, что в случае одиночной молекулы оптимальным расположением молекулы н-алкана является горизонтальная ориентация (рис. 3а)

При построении энергетических картин установлено наличие локальных минимумов. Так, для молекулы н-октана, наблюдается локальный минимум $E = 0.4 \text{ kJ/mol}$. Положение локальных минимумов энергии относительно графенового слоя и углеводородной молекулы приведены на рис. 3а. Как видно из рисунка координата минимума относительно слоя соответствует положению атомов водорода углеводородной молекулы. Увеличение количества молекул углеводородов показывает, что вертикальная ориентация становится предпочтительней (таблица 2), создавая на поверхности некоторую упорядоченную структуру с гексагональной упаковкой и с вектором трансляции, $a=4.84 \text{ \AA}$. Расстояние атома водорода до плоскости графена составляет 2.8 \AA (рис. 3б.)

При взаимодействии углеводородной молекулы с вертикальной ориентацией длина молекулы не влияет на значение удельной энергии взаимодействия (таблица 2). Это означает, что взаимодействие графена с вертикально расположенными молекулами происходит только с ближайшими к слою атомами молекул углеводорода. Также можно заметить, что при увеличении длины углеводородной молекулы энергия взаимодействия становится ниже, то есть молекулы углеводородов, упорядочиваясь, создают дополнительную энергию. Например, для молекулы н-тетракозан ($C_{24}H_{50}$) дополнительная энергия составляет -6.479 kJ/mol.

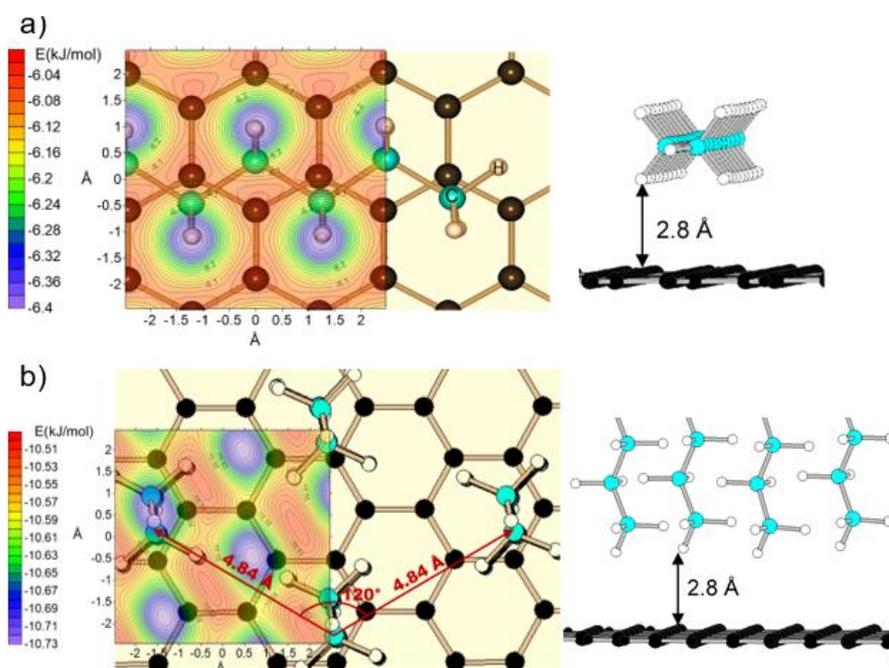


Рис. 3. Картина распределения удельной энергии E взаимодействия относительно плоскости графена и углеводородной молекулы на примере н-тетракозана ($C_{24}H_{50}$)

Fig. 3. The picture of specific energy distribution E of the interaction relative to the graphene plane and the hydrocarbon molecule by the example of n-tetracosan ($C_{24}H_{50}$)

При больших концентрациях наночастиц графена в нефти, можно наблюдать все закономерности проявляющиеся в НФ. Во-первых, увеличение динамической вязкости с ростом концентраций наночастиц, во-вторых, уменьшение вязкости с ростом температуры [14, 25]. На рис. 4а наблюдается семейство кривых относительных вязкостей, которые хорошо описываются квадратичными функциями: пунктирной линией приведена функция, предложенная в работе [27]; сплошной черной линией предложенная в работе [19].

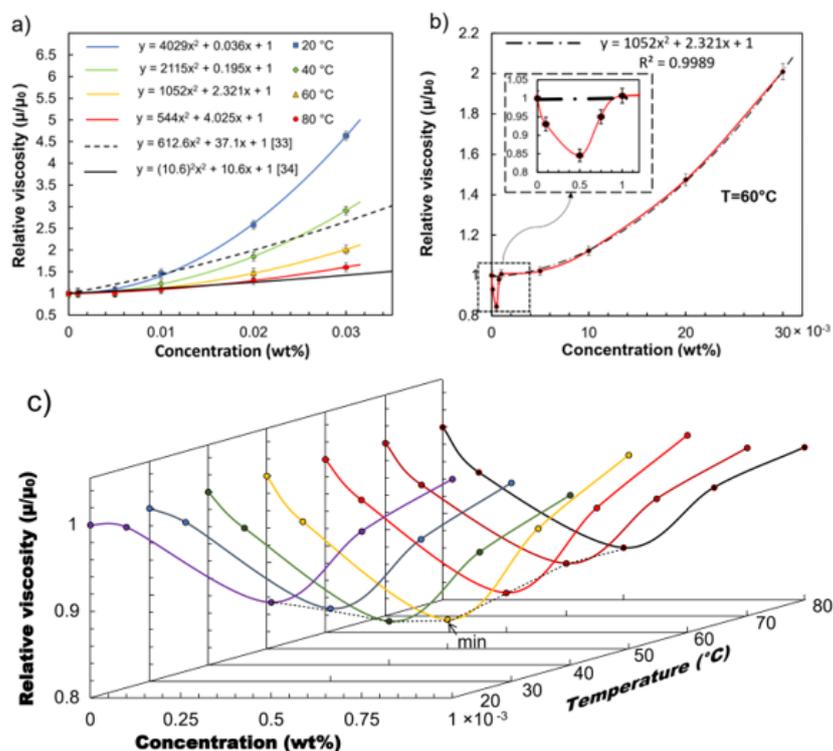


Рис. 4. Зависимость относительной вязкости нефти от концентрации графеновых наночастиц:
 а) для больших концентраций;
 б) для всех концентраций при температуре 60 °С (на вставке область с понижением вязкости);
 с) для малых концентраций при различных температурах

Fig. 4. Relative oil viscosity versus concentration of graphene nanoparticles:
 а) for high concentrations;
 б) for all concentrations at temperature 60 °С (inset area with decreasing viscosity);
 с) for low concentrations at different temperatures

Для малых концентраций наблюдается иная корреляционная кривая. На рис. 4b приведена зависимость относительной вязкости для температуры 60 °С. На графике (рис. 4b) наблюдается область (на вставке) понижения вязкости. Подобное снижение вязкости НФ, содержащей частицы графена со схожей корреляцией (рис. 4с), наблюдается в работе [12]. Также снижение вязкости oil-based НФ наблюдалась в работе [26], авторы отмечают малость концентраций наночастиц графена, при росте содержания частиц эффект пропадает.

Попытаемся понять причину такого поведения НФ (базовой жидкостью является нефть), содержащих графеновые наночастицы. В плотной несущей среде вокруг нефтяных дисперсных частиц формируется окружение молекул жидкости. Молекулы нефти притягиваются друг к другу за счет взаимодействия полярных групп нефтяных соединений, таких как смолы и нафтеновые кислоты, а также

благодаря силам взаимодействия циклических и парафиновых углеводородов. Такие возникающие структуры увеличивают эффективную вязкость. Известно, что должно быть минимум два различных механизма релаксации нефтяных дисперсных частиц, определенных взаимодействием микрофлуктуаций и наночастиц. Другими словами, вокруг наночастицы образуется микрофлуктуация из молекул среды, на которых происходит релаксация скорости наночастиц. Следовательно, на релаксационные процессы будет оказывать влияние структура этой микрофлуктуации [9] и ее взаимодействие с наночастицами.

Таким образом, вязкость, как функция релаксации, может описываться выражением:

$$\mu = \mu_0 \left(a_1 \exp \left(\frac{W_1}{RT} \right) + a_2 \exp \left(\frac{W_2}{RT} \right) \right), \quad (3)$$

где W_1 — удельная энергия взаимодействия углеводородных молекул с микрофлуктуациями; W_2 — удельная энергия взаимодействия внутри микрофлуктуаций.

Действительно, на рис. 5 наблюдается два участка, что подтверждает выбранную модель.

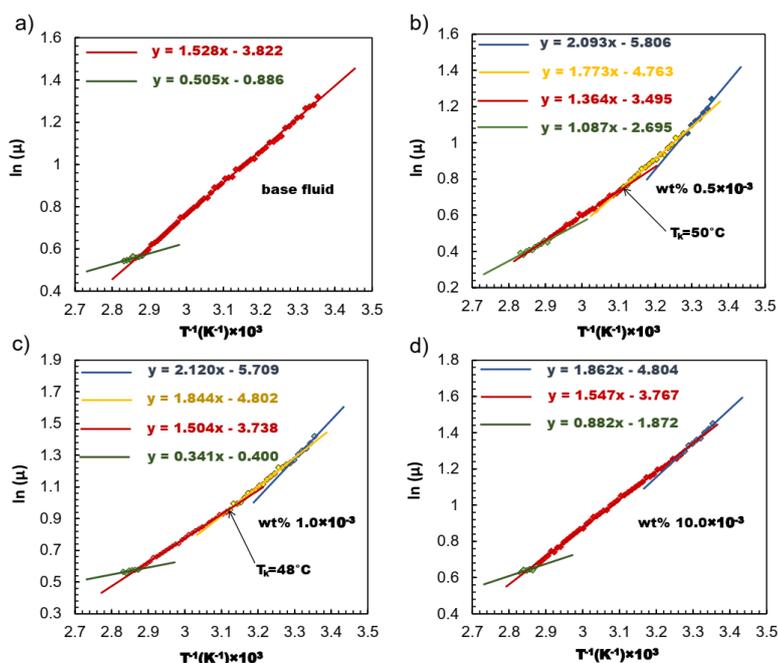


Рис. 5. Зависимость $\ln(\mu)$ от $1/T$ для различных концентраций наночастиц в нефти: а) для чистой нефти (базовый флюид); б) for oil-based НФ wt% 0.5×10^{-3} ; в) for oil-based НФ wt% 1.0×10^{-3} ; г) for oil-based НФ wt% 10.0×10^{-3}

Fig. 5. Dependence of $\ln(\mu)$ on $1/T$ for different concentrations of nanoparticles in oil: а) for pure oil (base fluid); б) for oil-based НФ wt% 0.5×10^{-3} ; в) for oil-based НФ wt% 1.0×10^{-3} ; г) for oil-based НФ wt% 10.0×10^{-3}

В присутствии графеновых наночастиц в нефти, происходит переключение связей углеводородов, что разрыхляет компактные скопления и создает новые. В результате формируются новые устойчивые структуры с новой энергией активации. Можно предположить, что диффузионные процессы обеспечивают стабильность таким флуктуационным структурам. Данное взаимодействие наночастиц графена углеводородов нефти добавит в уравнение (3) дополнительные члены:

$$\mu = \mu_0 \left(a_1 \exp\left(\frac{W_1}{RT}\right) + a_2 \exp + \dots a_n \exp\left(\frac{W_n}{RT}\right) \right) \quad (4)$$

Следовательно, на графике $\ln(\mu) = f(1/T)$ должен появиться дополнительный излом. Действительно, на рис. 5b, 5c можно наблюдать появление дополнительного излома при малых концентрациях наночастиц графена. Почему же вязкость при этом не увеличивается? По данным эксперимента происходит перераспределение по энергиям активации, что в сумме снижает общую вязкость. Так для чистой нефти наблюдается 1 излом с $W_1 = 12.7$ кДж/мол и $W_2 = 4.2$ кДж/мол с критической температурой 75 °С. Для НФ с малой концентрацией $wt = 0.5\%$ наночастиц графена появляется 3 излома с энергиями активации $W_1 = 17.4$ кДж/мол, $W_2 = 14.7$ кДж/мол, $W_3 = 11.3$ кДж/мол и, $W_4 = 9.0$ кДж/мол с критическими температурами $T_1 = 30$ С $T_2 = 50$ С и $T_3 = 70$ С (рис. 5b), которые подставляя в уравнение (4) дадут уменьшение вязкости. Так же критическим параметром здесь выступает температура, что подтверждается оценкой относительной вязкости при разной температуре и концентрации. Из рис. 5c видно, что максимальное снижение вязкости наблюдается при температуре 50 °С, что является одной из критических точек при анализе энергий активаций (рис. 5b). С увеличением концентрации меняется флуктуационное поле скоростей в окружении наночастиц, при этом разрушаются структуры вокруг графеновых наночастиц. При анализе функции $\ln(\mu) = f(1/T)$ для концентрации 10% появление области с критической точкой в районе 50 °С не наблюдается, что свидетельствует об исчезновении структурирования (рис. 5d). Сформировавшиеся структуры, с добавлением объемного взаимодействия, оказываются подобными структурам появляющихся вокруг сферических наночастиц [32, 33]. Это может быть причиной исчезновения дополнительного излома с характерной (для графеновых наночастиц) энергией активации. Вследствие этого зависимость вязкости от концентрации графеновых наночастиц становится такой же как в случае сферических.

Структура микрофлуктуации будет определяться локальным взаимодействием наночастиц и молекул среды. Можно считать, что процесс релаксации скорости наночастиц, сопровождается увеличением плотности жидкости в области движения наночастиц.

В структурно-кинетической теории [9] эффективная вязкость нефти зависит от числа структурных связей, определяющих состояние неньютоновской жидкости.

$$S(t) = \frac{N(t)}{N_0}, \quad (5)$$

где N_0 — число структурных связей в единице объема; $N(t)$ — число разрушенных связей.

$$S_1 = 1 - S(t), \quad (6)$$

где S_1 — доля неразрушенных связей.

Из результатов моделирования следует, что в присутствии графеновых частиц во флюиде добавляется взаимодействие, меняющее локальную концентрацию молекул несущей жидкости, создавая локальные домены из молекул углеводородов на листе графена (рис. 3). В результате перестраиваются структурные связи за счет микрофлуктуаций плотности молекул нефти. Таким образом, переключение связей зависит от энергии взаимодействия. Разрыв существующих структурных связей непосредственно сказывается на вязкости нефти.

Изменение эффективной вязкости в зависимости от числа разрушенных связей можно представить следующим выражением:

$$\mu(S) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \exp\left(-\frac{S}{S_0}\right) = \mu_\infty \left(1 + \left(\frac{\mu_0 - \mu_\infty}{\mu_\infty}\right) \exp\left(-\frac{S}{S_0}\right)\right) \quad (7)$$

где S_0 — доля связей, при которых происходит значительное изменение связей.

Из формулы (7) следует, что добавление графеновых частиц ведет к уменьшению вязкости, за счет разрыва структурных связей вокруг микрофлуктуаций плотности нефти.

Из предложенной модели следует, что при возрастании концентрации графеновых наночастиц, увеличивается число микрофлуктуаций и их молекулярная масса. Такой эффект приводит к выстраиванию новых структурных связей, которые должны увеличить вязкость, согласно (7). Действительно, на рис. 2b наблюдается увеличение вязкости с ростом концентрации, что как раз и соответствует устоявшемуся представлению о кинетических процессах в НФ [14, 25, 32, 33].

В подтверждение данной модели было проведено дополнительное исследование прямого наблюдения формирования подобных упорядоченных микрофлуктуаций. Для этого был получен нанофлюид с концентрацией графена wt $0.5 \times 10^{-3}\%$, базовым флюидом в котором выступал жидкий парафин при температуре 60 °С. Далее такой нанофлюид наносился на пластинку из монокристалла кремния. Кремневая пластинка располагалась под небольшим углом к горизонту, для создания ламинарного течения парафина под действием земной гравитации (рис. 6a). После затвердевания парафина поверхность пластинки исследовалась при помощи атомно-силового микроскопа NtegraAura (NTMDT) полуконтактным методом. Результаты исследования AFM приведены на рисунке 6b. Из рисунка 6b видно, что наночастицы графена имеют строгую ориентацию вдоль потока (частицы, выделенные треугольниками). Сами частицы выстраиваются в линию (рис. 6b указано стрелкой) и расстояния

между частицами примерно равны и составляют для выделенной линии от 700–800 нм. Из данного эксперимента можно наблюдать самоструктурирование наночастиц графена в потоке несущей жидкости, что подтверждает гипотезу о формировании микрофлуктуаций, высказанную выше.

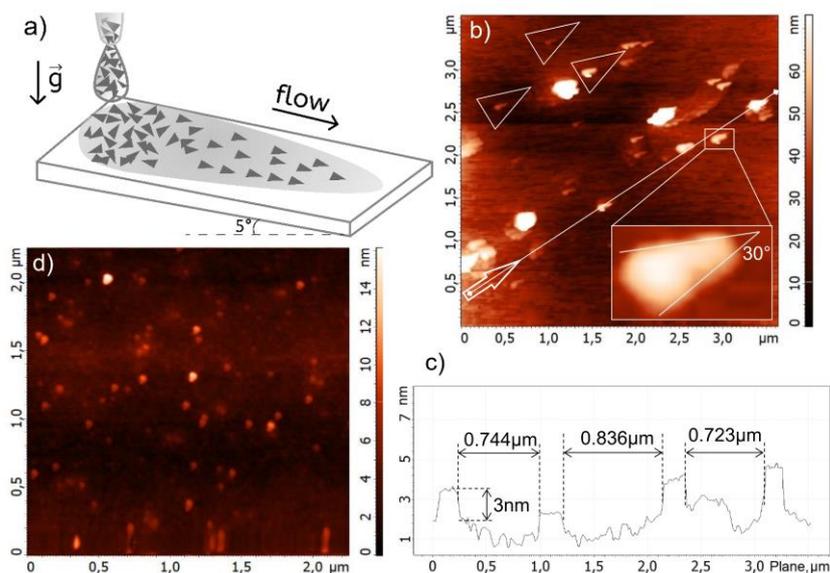


Рис. 6. Модель течения наножидкости: а) схема эксперимента по созданию потока наножидкости на поверхности кремневой пластики под действием земной гравитации; б) AFM изображение поверхности кремневой пластинки после истечения по ней графеновой наножидкости на основе парафина; в) Профиль вдоль выделенной линии; д) AFM изображение поверхности кремневой пластинки после истечения по ней графеновой наножидкости на основе дистиллированной воды

Fig. 6. Model of nanofluid flow: а) schematic of an experiment to create nanofluid flow on the surface of a silicon wafer under the action of Earth's gravity; б) AFM image of the surface of a silicon wafer after the flow of a paraffin-based graphene nanofluid; в) sectional height profile from the AFM image; д) AFM image of a silicon wafer surface after the flow of a distilled water-based graphene nanofluid

Заклучение

Для НФ на основе нефти, содержащих графеновые наночастицы наблюдается снижение коэффициента динамической вязкости при малых концентрациях частиц. Механизм снижения вязкости связан с формированием самоструктурированных микрофлуктуаций в процессе движения наночастиц в потоке несущей жидкости. Такое поведение НФ возможно только в жидкостях, где молекулы имеют большую энергию Ван-дер-ваальсового взаимодействия с

наночастицами, как, например, графена с молекулами гидрофобных углеводородов. В случае малого Ван-дер-ваальсового взаимодействия самоструктурированные микрофлуктуации не формируются, например, для молекул воды. Так, для водной суспензии графена, эксперимент, по свободному стеканию нанофлюида, не показал структурирования наночастиц графена, что можно наблюдать на рисунке 6d. Действительно, для водных и спиртовых суспензий графена снижение вязкости не наблюдалось, что подтверждается многочисленными исследованиями реологии графеновых нанофлюидов и отражено во множестве литературных источников [10, 11, 14, 17, 21, 25, 31]. Предположительно, подобное явление невозможно в случае сферических наночастиц, поскольку последние должны создавать неоднородности потока.

При дальнейшем изучении самоструктурирования частиц графена в потоке несущей жидкости можно добиться увеличения концентраций наночастиц в базовом флюиде без ущерба повышения вязкости, что могло бы повысить эффективность применения НФ в нефтяной и энергетической промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Беленков Е. А. Структура и электронные свойства кристаллов, состоящих из графеновых слоев L6, L4–8, L3–12 и L4–6–12 / Е. А. Беленков, А. Е. Коченгин // ФТТ. 57, 2071–2078. 2015. <https://doi.org/10.1134/S1063783415100030>
- 2 Китайгородский А. И. Молекулярные кристаллы / А. И. Китайгородский. Москва: Наука, 1971. 424 с. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-410550-8.x5001-1>
- 3 Нелюбов Д. В. Исследование реологических и низкотемпературных свойств модельных растворов твердых компонентов нефти: научная статья / Д. В. Нелюбов, Л. П. Семихина, А. А. Федоренко // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1. № 2 (2). С. 38-49.
- 4 Пахаруков Ю. В. Фильтрация нефти в пористой среде с участием графеновых наночастиц / Ю. В. Пахаруков, Ф. К. Шабиев, Б. В. Григорьев, Р. Ф. Сафаргалиев, И. Р. Поточняк // ПМТФ. 2019. Т. 60. № 1. С. 37-40. DOI: 10.15372/PMTF20190105
- 5 Пахаруков Ю. В. Формирования волновой структуры на поверхности графеновой пленки / Ю. В. Пахаруков, Ф. К. Шабиев, В. В. Мавринский, Р. Ф. Сафаргалиев, В. В. Воронин // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109. № 9. С. 634-638. DOI: 10.1134/S0370274X19090133
- 6 Полубоярцев Е. Л. Особенности транспорта аномальных нефтей. Введение в реологию: учеб. пособие / Е. Л. Полубоярцев, С. В. Петров, Е. В. Исупова, Н. А. Чикова. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2014. 70 с.
- 7 Рогачев М. К. Реология нефти и нефтепродуктов / М. К. Рогачев, Н. К. Кондрашева. Уфа: Издательство Уфимского государственного нефтяного технического университета, 2000. 89 с.
- 8 Сюняев З. И. Нефтяные дисперсные системы / З. И. Сюняев, Р. З. Сюняев, Р. З. Сафиева. Москва: Химия, 1990. 226 с.
- 9 Хасанов М. М. Нелинейные и неравновесные эффекты в реологически сложных средах / М. М. Хасанов, Г. Т. Булгакова. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 288 с.

- 10 Ahmadi M. H. Utilization of hybrid nanofluids in solar energy applications: A review / M. H. Ahmadi, M. Ghazvini, M. Sadeghzadeh, M. A. Nazari, M. Ghalandari // *Nano-Structures and Nano-Objects*. 2019. Vol. 20. Art. 100386. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2019.100386>.
- 11 Bahiraei M. Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions / M. Bahiraei, S. Heshmatian // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 196. Pp. 1222-1256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.076>.
- 12 Basu R. Faster in-plane switching and reduced rotational viscosity characteristics in a graphene-nematic suspension / R. Basu, D. Kinnamon, N. Skaggs, J. Womack // *Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 119. Art. 185107. <https://doi.org/10.1063/1.4949481>
- 13 Chakarova-Käck S. D. Application of van der Waals density functional to an extended system: Adsorption of benzene and naphthalene on graphite / S. D. Chakarova-Käck, E. Schröder, B. I. Lundqvist, D. C. Langreth // *Physical Review Letters*. 2006. No. 96. Art. 146107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.146107>
- 14 Das S. K. *Science and technology* / S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Yu. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, United States, 2008.
- 15 Davidson E. Basis set selection for molecular calculations / E. Davidson, D. Feller // *Chemical Reviews*. 1986. Vol. 86. No. 4. Pp. 681-696. <https://doi.org/10.1021/cr00074a002>
- 16 Ding F. Pore wettability for enhanced oil recovery, contaminant adsorption and oil/water separation: A review / F. Ding, M. Gao // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 289. Art. 102377. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102377>.
- 17 Esfe M. H. Application of conventional and hybrid nanofluids in different machining processes: A critical review / M. H. Esfe, M. Bahiraei, A. Mir // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020. Vol. 282. Art. 102199. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102199>.
- 18 Girifalco L. A. Energy of cohesion, compressibility, and the potential energy functions of the graphite system / L. A. Girifalco, R. A. Lad // *The Journal of Chemical Physics*. 1956. Vol. 25. No. 693. <https://doi.org/10.1063/1.1743030>
- 19 Haisheng Chen. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids / Haisheng Chen, Yulong Ding, Yurong He, Chunqing Tan // *Chemical Physics Letters*. 2007. Vol. 444. Iss. 4-6. Pp. 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.07.046>
- 20 Hajiabadi S. H. An overview on the significance of carbon-based nanomaterials in upstream oil and gas industry / S. H. Hajiabadi, H. A. M. Kalateh-Aghamohammadi, M. Shorgasthi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 186. Art. 106783. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106783>.
- 21 Hamze S. Graphene-based nanofluids: A comprehensive review about rheological behavior and dynamic viscosity / S. Hamze, D. Cabaleiro, P. Estelle // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 325. Art. 115207. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115207>.
- 22 Hehre W. J. Self-consistent molecular-orbital methods. Use of Gaussian expansions of slater-type atomic orbitals / W. J. Hehre, R. F. Stewart, J. A. Pople // *Journal of Chemical Physics*. 1969. Vol. 51. Art. 2657. <https://doi.org/10.1063/1.1672392>
- 23 Jongsuk Lee. Temperature-dependent rheological behavior of nanofluids rich in carbon-based nanoparticles / Jongsuk Lee, Yan Chen, Hong Liang, Sunghan Kim // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 325. Art. 114659. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114659>
- 24 Malkin A. Ya. Chapter 6. Applications of rheology / A. Ya. Malkin, A. Isayev // *Rheology*. 3rd edition. ChemTec Publishing, 2017. Pp. 377-432. <https://doi.org/10.1016/B978-1-927885-21-5.50012-6>.

- 25 Mercan H. Chapter 3. Thermophysical and rheological properties of hybrid nanofluids / H. Mercan // *Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer*. Edited by H. M. Ali. Academic Press, 2020. Pp. 101-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819280-1.00003-3>.
- 26 Ning Wang. Thermal properties and solar collection characteristics of oil-based nanofluids with low graphene concentration / Ning Wang, Guoying Xu, Shuhong Li, Xiaosong Zhang // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. Pp. 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.301>
- 27 Pak B. C. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles / B. C. Pak, Y. I. Cho // *Experimental Heat Transfer. An International Journal*. 1998. No. 11 (2). Pp. 151-170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- 28 Pakharukov Y. V. Quenching of graphene suspension photoluminescence with saturated hydrocarbons / Y. V. Pakharukov, F. K. Shabiev, R. F. Safargaliev, S. S. Volkova // *Colloids and Interface Science Communications*. 2021. Vol. 42. Art. 100431. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100431>
- 29 Pakharukov Yu. V. Investigating oil displacement from the porous medium with the graphene suspension / Yu. V. Pakharukov, F. K. Shabiev, R. F. Safargaliev // *AIP Conference Proceedings* 2015. 2018. Art. 020068. <https://doi.org/10.1063/1.5055141>
- 30 Radnia H. A novel nanofluid based on sulfonated graphene for enhanced oil recovery / H. Radnia, A. Rashidi, A. R. S. Nazar, M. M. Eskandari, M. Jalilian // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Vol. 271. Pp. 795-806. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.070>.
- 31 Rubbi F. A comprehensive review on advances of oil-based nanofluids for concentrating solar thermal collector application / F. Rubbi, L. Das, Kh. Habib, N. Aslfattahi, R. Saidur, S. Ul Alam // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 338. Art. 116771. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116771>.
- 32 Rudyak V. Ya. On the effective viscosity of nanosuspensions / V. Y. Rudyak, A. A. Belkin, V. V. Egorov // *Technical Physics*. 2009. Vol. 54. Pp. 1102-1109. <https://doi.org/10.1134/S1063784209080039>
- 33 Rudyak V. Ya. Viscosity of nanofluids. Why it is not described by the classical theories / V. Ya. Rudyak // *Advances in Nanoparticles*. 2013. Vol. 2. Pp. 266-279.
- 34 Yakasai F. Current developments and future outlook in nanofluid flooding: A comprehensive review of various parameters influencing oil recovery mechanisms / F. Yakasai, M. Z. Jaafar, S. Bandyopadhyay, A. Agi // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 93. Pp. 138-162. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.017>.

Farid K. SHABIEV¹
Yuri V. PAKHARUKOV²
Ruslan F. SAFARGALIEV³
Boris S. YEZDIN⁴
Sergey A. VASILIEV⁵

UDC 532.2, 621.6

USE OF NANOFUIDS BASED ON CARBON NANOPARTICLES TO DISPLACE OIL FROM THE POROUS MEDIUM MODEL*

- ¹ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, University of Tyumen;
Tyumen Industrial University
faridshab@mail.ru
- ² Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, University of Tyumen;
Tyumen Industrial University
pacharukovyu@yandex.ru
- ³ Senior Lecturer, University of Tyumen;
Assistant, Tyumen Industrial University
ruslan.safargaliev@mail.ru
- ⁴ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Novosibirsk State University
bse@nsu.ru
- ⁵ Chief Engineer of Applied Physics, Faculty of Physics,
Novosibirsk State University
svasiljev@mail.ru

* Rheological studies of oil were carried out at the Testing Laboratory for Drilling and Cement Muds of the Center for Advanced Research and Innovative Development, Tyumen Industrial University.

Citation: Shabiev F. K., Pakharukov Yu. V., Safargaliev R. F., Yezdin B. S., Vasiliev S. A. 2022. "Use of nanofluids based on carbon nanoparticles to displace oil from the porous medium model". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 3 (31), pp. 106-125.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125

Abstract

Understanding the interaction mechanisms between graphene nanoparticles (GNs) and oil molecules is crucial for successful oil recovery. Numerous studies have shown that nanofluids, and in particular nanofluids (NF) from the graphene family (GNF), are suitable candidates for enhanced oil recovery in various reservoirs. Increased oil recovery from nanofluid injection is attributed to changes in wettability, decreases in interfacial tension and changes in viscosity. Therefore, knowing the mechanisms that influence the viscosity of the GNF is an urgent task of modern science, both fundamental and applied.

A comprehensive study of the molecular interaction between graphene nanoparticles and hydrocarbon oil molecules was carried out in order to understand the mechanisms that affect the viscosity of nanofluids. The paper presents the results of a study of the rheological properties of oil with different content of graphene nanoparticles in it. At low concentrations of graphene nanoparticles, a 10%-17% decrease in the dynamic viscosity of the base fluid was observed. It is also shown that the relative viscosity is affected not only by the concentration, but also by the temperature. Thus, for the mass fraction of graphene nanoparticles $w_t = 0.5 \times 10^{-3}\%$ and temperature $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$, a maximum viscosity reduction of 17% is observed. By increasing the concentration of graphene nanoparticles from $w_t = 5 \times 10^{-3}\%$ and more, the oil shows the rheological properties of nanofluid. Based on the data obtained by computer simulation and direct observation of self-assembly of graphene nanoparticles and hydrocarbon molecules of oil, a mechanism has been proposed to explain the reason for the decrease of viscosity of nanofluid at low concentrations of nanoparticles. It was also shown that this nanofluid behavior is mainly possible for hydrocarbon liquids as base fluid and planar graphene nanoparticles.

Keywords

Graphene, graphene-based nanofluids, nanofluid viscosity, oil viscosity.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125

REFERENCES

- 1 Belenkov E. A., Kochengin A. E. 2015. "Structure and electronic properties of crystals consisting of graphene layers L6, L4-8, L3-12 and L4-6-12". FTT. 57, 2071-2078 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063783415100030> [In Russian]
- 2 Kitaygorodsky A. I. 1971. Molecular crystals. Moscow: Nauka. 424 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-410550-8.x5001-1> [In Russian]
- 3 Nelyubov D. V., Semikhina L. P., Fedorets A. A. 2015. "Research of rheological and low-temperature properties of model solutions of solid components of oil: scientific article". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 1, no. 2 (2), pp. 38-49. [In Russian]
- 4 Pakharukov Yu. V., Shabiev F. K., Grigoriev B. V., Safargaliev R. F., Potochnyak I. R. 2019. "Oil filtration in a porous medium with the participation of graphene nanoparticles". PMTF, vol. 60, no. 1, pp. 37-40. DOI: 10.15372/PMTF20190105 [In Russian]

- 5 Pakharukov Yu. V., Shabiev F. K., Mavrinsky V. V., Safargaliev R. F., Voronin V. V. 2019. "Formation of a wave structure on the surface of a graphene film". *JETP Letters*, vol. 109, no. 9, pp. 634-638. DOI: 10.1134/S0370274X19090133 [In Russian]
- 6 Poluboyartsev E. L., Petrov S. V., Isupova E. V., Chikova N. A. 2014. Peculiarities of anomalous oil transport. Introduction to rheology: textbook. Ukhta: Ukhta State Technical University. 70 p. [In Russian]
- 7 Rogachev M. K., Kondrasheva N. K. 2000. Rheology of oil and oil products. Ufa: Ufa State Oil Technical University Publishing House. 89 p. [In Russian]
- 8 Sunyaev Z. I., Sunyaev R. Z., Safieva R. Z. 1990. Oil disperse systems. Moscow: Chemistry, 1990. 226 p. [In Russian]
- 9 Khasanov M. M., Bulgakova G. T. 2003. Non-linear and non-equilibrium effects in rheologically complex media. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research. 288 p. [In Russian]
- 10 Ahmadi M. H., Ghazvini M., Sadeghzadeh M., Nazari M. A., Ghalandari M. 2019. "Utilization of hybrid nanofluids in solar energy applications: A review". *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 20, art. 100386. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2019.100386>.
- 11 Bahiraei M., Heshmatian S. 2019. "Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions". *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1222-1256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.076>.
- 12 Basu R., Kinnamon D., Skaggs N., Womack J. 2016. "Faster in-plane switching and reduced rotational viscosity characteristics in a graphene-nematic suspension". *Journal of Applied Physics*, vol. 119, art. 185107. <https://doi.org/10.1063/1.4949481>
- 13 Chakarova-Käck S. D., Schröder E., Lundqvist B. I., Langreth D. C. 2006. "Application of van der Waals density functional to an extended system: Adsorption of benzene and naphthalene on graphite". *Physical Review Letters*, no. 96, art. 146107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.146107>
- 14 Das S. K., Choi S. U. S., Yu W. 2008. Science and technology. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, United States.
- 15 Davidson E., Feller D. 1986. "Basis set selection for molecular calculations". *Chemical Reviews*, vol. 86, no. 4, pp. 681-696. <https://doi.org/10.1021/cr00074a002>
- 16 Ding F., Gao M. 2021. "Pore wettability for enhanced oil recovery, contaminant adsorption and oil/water separation: A review". *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 289, art. 102377. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102377>.
- 17 Esfe M. H., Bahiraei M., Mir A. 2020. "Application of conventional and hybrid nanofluids in different machining processes: A critical review". *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 282, art. 102199. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102199>.
- 18 Girifalco L. A., Lad R. A. 1956. "Energy of cohesion, compressibility, and the potential energy functions of the graphite system". *The Journal of Chemical Physics*, vol. 25, no. 693. <https://doi.org/10.1063/1.1743030>
- 19 Haisheng Chen, Yulong Ding, Yurong He, Chunqing Tan. 2007. "Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids". *Chemical Physics Letters*, vol. 444, iss. 4-6, pp. 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.07.046>
- 20 Hajiabadi S. H., Kalateh-Aghamohammadi H. A. M., Shorgasthi M. 2020. "An overview on the significance of carbon-based nanomaterials in upstream oil and gas industry". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 186, art. 106783. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106783>.

- 21 Hamze S., Cabaleiro D., Estelle P. 2021. "Graphene-based nanofluids: A comprehensive review about rheological behavior and dynamic viscosity". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 325, art. 115207. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115207>.
- 22 Hehre W. J., Stewart R. F., Pople J. A. 1969. "Self-consistent molecular-orbital methods. Use of Gaussian expansions of slater-type atomic orbitals". *Journal of Chemical Physics*, vol. 51, art. 2657. <https://doi.org/10.1063/1.1672392>
- 23 Jongsuk Lee, Yan Chen, Hong Liang, Sunghan Kim. 2021. "Temperature-dependent rheological behavior of nanofluids rich in carbon-based nanoparticles". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 325, art. 114659. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114659>
- 24 Malkin A. Ya., Isayev A. 2017. "Chapter 6. Applications of rheology". *Rheology*. 3rd edition. ChemTec Publishing. Pp. 377-432. <https://doi.org/10.1016/B978-1-927885-21-5.50012-6>.
- 25 Mercan H. 2020. "Chapter 3. Thermophysical and rheological properties of hybrid nanofluids". *Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer*. Edited by H. M. Ali. Academic Press. Pp. 101-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819280-1.00003-3>.
- 26 Ning Wang, Guoying Xu, Shuhong Li, Xiaosong Zhang. 2017. "Thermal properties and solar collection characteristics of oil-based nanofluids with low graphene concentration". *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.301>
- 27 Pak B. C., Cho Y. I. 1998. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". *Experimental Heat Transfer. An International Journal*, no. 11 (2), pp. 151-170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- 28 Pakharukov Yu. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F., Volkova S. S. 2021. "Quenching of graphene suspension photoluminescence with saturated hydrocarbons". *Colloids and Interface Science Communications*, vol. 42, art. 100431. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100431>
- 29 Pakharukov Yu. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F. 2018. "Investigating oil displacement from the porous medium with the graphene suspension". *AIP Conference Proceedings 2015*, art. 020068. <https://doi.org/10.1063/1.5055141>
- 30 Radnia H., Rashidi A., Nazar A. R. S., Eskandari M. M., Jalilian M. 2018. "A novel nanofluid based on sulfonated graphene for enhanced oil recovery". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 271, pp. 795-806. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.070>.
- 31 Rubbi F., Das L., Habib Kh., Aslfattahi N., Saidur R., Ul Alam S. 2021. "A comprehensive review on advances of oil-based nanofluids for concentrating solar thermal collector application". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 338, art. 116771. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116771>.
- 32 Rudyak V. Ya., Belkin A. A., Egorov V. V. 2009. "On the effective viscosity of nanosuspensions". *Technical Physics*, vol. 54, pp. 1102-1109. <https://doi.org/10.1134/S1063784209080039>
- 33 Rudyak V. Ya. 2013. "Viscosity of nanofluids. Why it is not described by the classical theories". *Advances in Nanoparticles*, vol. 2, pp. 266-279.
- 34 Yakasai F., Jaafar M. Z., Bandyopadhyay S., Agi A. 2021. "Current developments and future outlook in nanofluid flooding: A comprehensive review of various parameters influencing oil recovery mechanisms". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 93, pp. 138-162. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.017>.