Тонкие химические технологии = Fine Chemical Technologies.
2024;19(6):485–496

ISSN 2410-6593 (Print)
ISSN 2686-7575 (Online)

Химия и технология органических веществ
Chemistry and technology of organic substances

УДК 519.87[665.761/532.13+661.666.4]*
https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496
EDN JTDOHN

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Математическая модель зависимости динамической вязкости моторных масел от температуры, концентрации сажи и ее морфологии

А.В. Лесин[1], ✉, А.В. Исаев[1], Б.П. Тонконогов[2], С.В. Дунаев[1], А.Б. Куликов[1]

[1] *Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Российская академия наук, Москва, 119991 Россия*

[2] *Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, 119991 Россия*

✉ *Автор для переписки, e-mail: lesinav@ips.ac.ru*

Аннотация

Цели. Быстрый холодный пуск аварийных и вспомогательных энергетических установок на базе дизельных двигателей в любое время должен осуществляться без особых проблем и в кратчайшие сроки. Одним из основных факторов, влияющих на безаварийный пуск энергетических установок, является состояние моторного масла. В процессе работы дизельного двигателя моторное масло накапливает в своем составе сажу, что негативно влияет на его реологические свойства. Цель работы — разработка математической модели изменения динамической вязкости моторных масел в зависимости от температуры с учетом концентрации сажи и ее морфологии на основе результатов экспериментальных исследований.

Методы. В качестве образцов масел для приготовления модельных смесей использовались штатно применяемые моторные масла для дизельных двигателей М-14$Д_2$СЕ и М-5з/14$Д_2$СЕ. В качестве дисперсной фазы суспензий использовался технический углерод марок N110, N220, N330 и N220 пылящий (негранулированный). Реологические свойства образцов определялись на ротационном реометре TA Instruments DHR-2. Полученные экспериментальные данные обрабатывались методами математической статистики с получением аппроксимирующих зависимостей.

Результаты. В работе представлены анализ различных подходов к описанию реологии суспензий и результаты экспериментальных исследований вязкостно-температурных характеристик (ВТХ) модельных образцов масел, содержащих сажу. Показано, что существующие модели зависимости динамической вязкости суспензий от температуры, объемной концентрации дисперсной фазы, размеров и формы ее частиц не позволяют адекватно описать ВТХ моторных масел, содержащих сажу. Предложена модель реологических свойств саже-масляных суспензий в виде математической зависимости их динамической вязкости от температуры, массовой концентрации сажи, плотности материала и размеров сажевых частиц, от характеристик формы и структуры первичных агрегатов, а также от соотношения размеров агрегатов и молекул дисперсионной среды.

Выводы. Показано, что для адекватного описания ВТХ моторных масел, содержащих сажу, необходимо учитывать характеристики структуры первичных агрегатов сажевых частиц. Разработана математическая модель ВТХ масел в виде зависимости их динамической вязкости от температуры, массовой концентрации сажи, плотности материала частиц, степени несферичности агрегатов, соотношения размеров частиц дисперсной фазы (агрегатов или одиночных частиц неагрегированной сажи) и молекул масла, а также структурности сажи, характеризуемой стандартным показателем — адсорбцией дибутилфталата.

Ключевые слова

математическая модель, динамическая вязкость, моторное масло, сажа, структура агрегатов, реологические свойства

Поступила: 20.08.2024
Доработана: 16.09.2024
Принята в печать: 21.10.2024

© А.В. Лесин, А.В. Исаев, Б.П. Тонконогов, С.В. Дунаев, А.Б. Куликов, 2024

Для цитирования

Лесин А.В., Исаев А.В., Тонконогов Б.П., Дунаев С.В., Куликов А.Б. Математическая модель зависимости динамической вязкости моторных масел от температуры, концентрации сажи и ее морфологии. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):485–496. https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496

RESEARCH ARTICLE

A mathematical model of the dynamic viscosity dependence of motor oils on temperature, soot concentration, and its morphology

Anatoly V. Lesin[1], ✉, Alexander V. Isaev[1], Boris P. Tonkonogov[2], Sergey V. Dunaev[1], Albert B. Kulikov[1]

[1] *A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

[2] *Gubkin University, Moscow, 119991 Russia*

✉ *Corresponding author, e-mail: lesinav@ips.ac.ru*

Abstract

Objectives. A quick cold start of emergency and auxiliary power units based on diesel engines should be possible at any time without problems and in the shortest possible time. The condition of the engine oil is one of the most important factors influencing the smooth start-up of power plants. During diesel engine operation, engine oil accumulates soot in its composition, negatively affecting its rheological properties. The aim of this research is to develop a mathematical model to describe changes in the dynamic viscosity of motor oils as a function of temperature. This model will account for the concentration of soot and its morphology, based on the results of experimental studies.

Methods. Standardly used motor oils for diesel engines M-14D_2SE and M-5z/14D_2SE were used as oil samples in the preparation of model mixtures. The dispersed phase of the suspensions comprised carbon black of the N110, N220, N330, and N220 grades, characterized by a dusty (nongranular) texture. The rheological properties of the samples were determined using a TA Instruments DHR-2 rotational rheometer. The experimental data was subjected to mathematical statistical processing, in order to obtain approximating dependencies.

Results. The paper presents an analysis of the various approaches to the description of the rheology of suspensions and the results of experimental studies of the viscosity-temperature characteristics (VTCs) of model samples of oils containing soot. The extant models of the dependence of the dynamic viscosity of suspensions on temperature, volume concentration of the dispersed phase, particle size and shape are demonstrated to be inadequate for the description of the VTCs of motor oils containing soot. A model of the rheological properties of soot-oil suspensions is proposed in the form of a mathematical dependence of their dynamic viscosity on temperature, mass concentration of soot, material density and size of soot particles, characteristics of the shape and structure of primary aggregates and the ratio of the sizes of aggregates and molecules of the dispersion medium.

Conclusions. It was demonstrated that a comprehensive description of the VTCs of engine oils containing soot necessitates the consideration of the structural characteristics of the primary aggregates of soot particles. A mathematical model of the VTCs of oils was developed. This model is based on the dependence of the dynamic viscosity of oils on temperature, mass concentration of soot, density of the particle material, degree of non-sphericity of aggregates, the ratio of the particle sizes of the dispersed phase (either aggregates or single particles of non-aggregated soot) and oil molecules, and on the structure of soot, characterized by adsorption of dibutyl phthalate.

Keywords

mathematical model, dynamic viscosity, engine oil, soot, structure of aggregates, rheological properties

Submitted: 20.08.2024
Revised: 16.09.2024
Accepted: 21.10.2024

For citation

Lesin A.V., Isaev A.V., Tonkonogov B.P., Dunaev S.V., Kulikov A.B. A mathematical model of the dynamic viscosity dependence of motor oils on temperature, soot concentration, and its morphology. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol*. 2024;19(6):485–496. https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-485-496

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных характеристик моторного масла (ММ) важное место занимает его вязкостно-температурная характеристика (ВТХ). Вязкость масла критически определяет такие эксплуатационные характеристики дизеля, как пусковые свойства, время выхода на режим принятия 100% нагрузки, эксплуатационный расход топлива — через работу трения собственно двигателя и затраты энергии на привод его агрегатов. Вязкость масла влияет также на суммарные выбросы токсичных веществ с отработавшими газами, т.к. масса выбросов пропорциональна расходу топлива, который возрастает с ростом работы трения, увеличивающейся пропорционально вязкости ММ, при условии постоянства внешней нагрузки.

ВТХ ММ достаточно полно характеризует его реологические свойства. ВТХ ММ, в первую очередь, определяется природой базовой основы масла. Зачастую для повышения вязкости и индекса вязкости используют вязкостные (загущающие) присадки. Их использование позволяет получить масла, обладающие пологой ВТХ. Загущающие присадки в сочетании с присадками, улучшающими смазочные свойства, позволяют создавать энергосберегающие масла [1].

Анализ показывает, что вязкость ММ не остается постоянной в процессе эксплуатации и изменяется в зависимости от накопления в нем различных загрязнений. При попадании в масло моторного топлива вязкость масла уменьшается, при этом снижается температура вспышки в открытом тигле, что используется в качестве диагностического параметра неисправностей двигателя, приводящих к разжижению масла моторным топливом.

В работающем ММ находится обычно небольшое количество продуктов износа трущихся деталей, это объясняется, с одной стороны, небольшим количеством продуктов износа, образующихся и выносимых ММ из зон трения, и, с другой стороны, их эффективным удалением из потока масла фильтрами очистки и оседанием в картере тяжелых частиц продуктов износа.

Наибольшее количество загрязнений работающего ММ, находящихся постоянно в циркулирующем потоке, представляют собой мелкие частицы сажи, не задерживаемые фильтрами. Эти частицы часто имеют в своем составе адсорбированные продукты деструкции и химического превращения компонентов масла в процессе эксплуатации.

В бюллетене[1] отмечается, что сажа находится в масле во взвешенном состоянии без каких-либо последствий до тех пор, пока не начинается снижение содержания активных компонентов присадок. Со временем сажа коагулирует и скапливается в картере, унося на своей поверхности компоненты присадок, что приводит к ускорению износа трущихся деталей (цилиндропоршневой группы и клапанного механизма).

По мере увеличения концентрации сажи в ММ растет его вязкость, постепенно достигая предельного значения, при котором эксплуатация дизеля становится невозможной, и масло заменяется на свежее. При этом увеличение вязкости масла по мере накопления в нем сажи может маскироваться снижением вязкости из-за попадания топлива в масло.

В связи с тем, что осуществление постоянного мониторинга состояния работающего масла трудозатратно и экономически не выгодно, представляет интерес разработка математической модели изменения динамической вязкости ММ в зависимости от возрастающей в процессе эксплуатации двигателя концентрации сажи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для исследования реологических свойств суспензий были выбраны штатно применяемые в среднеоборотных дизельных двигателях масла М-14$Д_2$СЕ и М-5з/$Д_2$СЕ (*ООО «Производство Завод имени Шаумяна»*, Россия).

В качестве дисперсной фазы в исследованиях использовались товарные марки технического углерода N110, N220, N220p (пылящая, отобранная из рукавного фильтра установки до грануляции) и N330 российского производства компании *АО «Нижнекамсктехуглерод»*.

В интересах сокращения объема статьи далее будут рассматриваться результаты экспериментов для ММ марок М-14$Д_2$СЕ и N220p, как дисперсной фазы.

Аппроксимирующая зависимость для чистого масла принята в виде:

$$\mu(T) = \exp\left(\exp\left(a \cdot T^{-4} + b \cdot T^{-2} + c\right)\right) - 1. \quad (1)$$

Значения коэффициентов в формуле (1): $a = -1.29 \cdot 10^{10}$; $b = 1.03 \cdot 10^{6}$; $c = -1.13$.

[1] Эксплуатационный бюллетень. Рекомендации по применению моторного масла фирмы Камминз. 2002 г., 15 с. [Cummins service Bulletin 4960819-07. 2002. 15 p.]

Методы

Реологические свойства модельных образцов исследовались на ротационном реометре DHR-2 (*TA Instruments*, США) с использованием измерительного узла конус-плоскость (диаметр плоскости 40 мм, угол между образующей конуса и плоскостью 2°). Температурные зависимости вязкости получали при постоянной скорости сдвига 100 $с^{-1}$ и скорости изменения температуры 2°C/мин при повышении температуры от 20 до 120°C и при понижении температуры от комнатной до −60°C.

Анализ аналитических подходов к описанию ВТХ саже-масляных суспензий

Большинство предлагаемых в научно-технической литературе зависимостей динамической вязкости дисперсных систем может быть сведено к виду:

$$\mu(T,\varphi) = \mu_0(T) \cdot F(\varphi), \quad (2)$$

где $\mu_0(T)$ — динамическая вязкость дисперсионной среды в функции абсолютной температуры; $F(\varphi)$ — функция объемной концентрации дисперсной фазы.

Одна из первых известных формул для расчета вязкости суспензий была предложена А. Эйнштейном [2]:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot F(\varphi) = \mu_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot \varphi), \quad (3)$$

где ε — коэффициент для частиц дисперсной фазы эллипсоидной формы (в частности, для сферических частиц в теоретически выведенной Эйнштейном формуле при сделанных им допущениях при расчете диссипации энергии при обтекании уединенной сферы вязкой жидкостью значение ε равно 2.5, а экспериментально полученное значение ε для сферических частиц равно 2.9); μ_0 — вязкость при фиксированной температуре.

Как видно, формула (3) является частным случаем формулы (2), из которой следует, что вязкость суспензии зависит от температуры только через вязкость дисперсионной среды. Необходимо отметить, что зависимость вида (3) дает корректные результаты только при $\varphi < 0.04$, когда можно пренебречь гидродинамическим взаимодействием между частицами дисперсной фазы.

При более высоких концентрациях частиц дисперсной фазы в суспензиях становится заметным взаимодействие полей течений дисперсионной среды вокруг соседних частиц, и вязкость нелинейно растет по мере увеличения концентрации дисперсной фазы. В этом случае становится более адекватным уравнение более общего вида [2]:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left(1 + \varepsilon_1 \cdot \varphi + \varepsilon_2 \cdot \varphi^2 + \varepsilon_3 \cdot \varphi^3\right), \quad (4)$$

где значения коэффициентов ε_1, ε_2, ε_3 различны у разных авторов. В [3] приведены многочисленные варианты значений этих коэффициентов для различных диапазонов значений φ, при этом практически во всех литературных источниках $\varepsilon_1 = 2.5$, а остальные коэффициенты могут существенно отличаться. Например, в [4] приводится формула Ванда с коэффициентами $\varepsilon_1 = 2.5$, $\varepsilon_2 = 6.25$, $\varepsilon_3 = 15.6$, которые позволяют получить достаточно высокую точность вычисления вязкости суспензий с невысоким содержанием дисперсной фазы ($\varphi < 0.3$), когда столкновения частиц и перекрывание сольватных слоев, сформированных частью дисперсионной среды, настолько редкое, что влияние их на течение суспензий весьма незначительное.

Предлагаются формулы для расчета вязкости суспензий, в которых функция объемной концентрации дисперсной фазы $F(\varphi)$ имеет иной вид. Так, в фундаментальной монографии С. Бретшнайдера [3] приводится формула Кунитца:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot (1 + 0.5 \cdot \varphi) \cdot (1 - \varphi)^4, \quad (5)$$

вычисления по которой, однако, дают абсолютно неверные и противоречащие экспериментальным данным результаты, что связано, очевидно, с ошибкой в знаке «−» во второй скобке. Эта ошибка, к сожалению, встречается во многих других обзорах и справочных изданиях.

При замене знака «−» на «+» результаты вычислений по формуле (5) оказываются достаточно близки к получаемым по другим проверенным аппроксимациям.

В [3] также приводится формула Кургаева, которая, по мнению автора [3], дает наилучшее соответствие с результатами экспериментального определения динамической вязкости суспензий в области значений $\varphi < 0.25$:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \varphi}{\left(1 - 1.2 \cdot \varphi^{\frac{2}{3}}\right)^2}\right). \quad (6)$$

В [4] приводится формула Барни и Мирзахи для концентрированных суспензий, проявляющих неньютоновские свойства:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{k_1 \cdot \varphi}{1 - k_2 \cdot \varphi}\right), \quad (7)$$

где $k_1 = 2.5$; $k_2 = 0.75 \ldots 1.5$ у разных авторов.

Рассмотренные выше аппроксимации (3)–(7) не учитывают размеры и форму частиц, хотя при определенных соотношениях концентрации и размеров частиц дисперсной фазы такой учет необходим. В связи с этим в [4] предлагается следующая аппроксимация для суспензий с частицами сферической формы:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left(1 + 2.5 \cdot \varphi + \frac{3}{4} \cdot \varphi \cdot \exp\left(\frac{m \cdot \varphi}{\left(\varphi - \varphi_{\max}\right)^2}\right)\right), \quad (8)$$

где $m = 2.2 + 0.033a$; a — размер частиц в мкм; $\varphi_{\max} = 0.74$ — концентрация частиц при максимально плотной упаковке.

Г.И. Келбалиев [4] отмечает, что результаты расчета вязкости суспензий по формуле (8) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако он, как и авторы ряда других работ (например, М.А. Морозова[2] и П.И. Пилов [5]), делает ошибочное заключение о том, что с увеличением размеров частиц дисперсной фазы вязкость также растет.

В работе П.И. Пилова [5] предложена теоретически обоснованная формула для расчета коэффициента динамической вязкости суспензий, учитывающая не только объемную концентрацию дисперсной фазы φ и радиус ее частиц r, но и свойства их поверхности путем введения в формулу толщины пограничного слоя дисперсионной среды на поверхности частиц дисперсной фазы λ:

$$\mu(\varphi, r, \lambda) = \mu_0 \cdot \frac{1}{1 - \left(1 + \frac{\lambda}{r}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{\varphi}{k_v}}}, \quad (9)$$

где k_v — коэффициент упаковки частиц дисперсной фазы, равный $\pi/6$ для кубической упаковки и 0.625 для произвольной упаковки.

Из формулы (9) видно, что с уменьшением размеров частиц дисперсной фазы вязкость суспензии растет. При этом необходимо учитывать, что работа [5] посвящена гравитационной сепарации полезных ископаемых, а, следовательно, связана в основном с грубодисперсными суспензиями. Поэтому требуется проверка адекватности этой формулы применительно к суспензиям сажи в ММ.

В работе В.Я. Рудяка [6], посвященной исследованию вязкости наножидкостей (дисперсных систем, состоящих из жидкости и наночастиц, к которым относится и неагрегированная сажа в ММ), показано, что зависимость вязкости суспензии от концентрации наночастиц, независимо от материала частиц, может быть описана формулой вида:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left(1 + \varepsilon_1 \cdot \varphi + \varepsilon_2 \cdot \varphi^2\right), \quad (10)$$

в которой коэффициенты ε_1 и ε_2 существенно превосходят по величине аналогичные коэффициенты в формуле (4). Так, в зависимостях для суспензий с наночастицами TiO_2 они равны соответственно 5.45 и 108.2, в отличие от 2.5 и 6.25 в формуле Ванда [4]. Для суспензий частиц оксида алюминия(III) ε_1 и ε_2 равны 7.3 и 123, а для частиц меди они составляют 3.645 и 468.72 соответственно. Из этого автор [6] делает вывод от том, что коэффициент вязкости наножидкостей растет значительно быстрее с увеличением концентрации частиц, чем коэффициент вязкости обычной дисперсной жидкости, а значения коэффициентов ε_1 и ε_2 могут зависеть от размеров наночастиц и их материала.

В результате молекулярно-динамического моделирования [6] была получена зависимость вида:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left[\mu_{rB} + \left(5.25 \cdot \varphi + 40.94 \cdot \varphi^2\right) \times \exp\left(-0.208 \cdot \frac{D}{d}\right)\right], \quad (11)$$

где $\mu_{rB} = 1 + 2.5 \cdot \varphi + 6.2 \cdot \varphi^2$ — относительная вязкость суспензии в формуле Бэтчелора [7], D — эффективный диаметр наночастиц, d — эффективный диаметр молекул дисперсионной среды. В [6] также показано, что реология неньютоновских наножидкостей хорошо описывается моделью вида:

$$\mu(\varphi) = K \cdot \gamma^{n-1}, \quad (12)$$

где γ — скорость сдвига; $n = 1 - 36.3 \cdot \varphi + 5 \cdot \varphi^2$; $K = 0.001 + \varphi - 230 \cdot \varphi^2 + 3700 \cdot \varphi^3$.

Автор [6] считает, что о ньютоновском поведении наножидкостей можно говорить лишь в том случае, когда базовая жидкость является ньютоновской, а концентрация наночастиц не очень велика. По-видимому, объемные концентрации наночастиц в этом случае не превышают 10–15%. Коэффициент динамической вязкости при таких концентрациях можно представить в виде (10). Теперь, однако, коэффициенты в этом соотношении должны быть функциями размера наночастиц:

$$\mu(\varphi) = \mu_0 \cdot \left(1 + \varepsilon_1(D) \cdot \varphi + \varepsilon_2(D) \cdot \varphi^2\right). \quad (13)$$

[2] Морозова М.А. *Теплопроводность и вязкость наножидкостей:* дис. ... канд. физ-мат. наук. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН; 2019. 103 с. [Morozova M.A. *Thermal conductivity and viscosity of nanofluids*. Diss. Cand. Sci. (Phys.-Math.). Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS; 2019. 103 p. (in Russ.).]

С целью оценки применимости рассмотренных выше аппроксимаций с их использованием были проведены расчеты кинематической вязкости масла М-14Д$_2$СЕ и суспензий сажи на основе этого масла и технического углерода марки N220 (пылящей) в диапазоне температур от 250 до 350 К, результаты которых приведены на рис. 1. Марка N220 выбрана ввиду того, что из доступных товарных марок технического углерода по морфологии она наиболее близка к образцам сажи, описанным в публикациях, посвященных проблемам сажеобразования в дизелях [8–14].

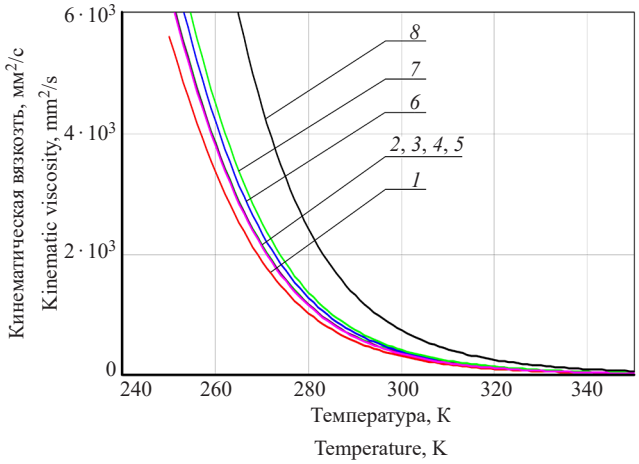

Рис. 1. Аппроксимации для ВТХ масла М-14Д$_2$СЕ (*1*) и его суспензий с сажей (5 об. %) по формулам: кривая (*2*) — формула (3); (*3*) — (6); (*4*) — (4); (*5*) — (7); (*6*) — (5); (*7*) — (11); (*8*) — (9)

Fig. 1. Approximations for the viscosity-temperature characteristics (VTCs) of M-14D$_2$SE oil (*1*) and its suspensions with soot (5 vol %) according to the Eqs.: curve (*2*) — Eq. (3); (*3*) — (6); (*4*) — (4); (*5*) — (7); (*6*) — (5); (*7*) — (11); (*8*) — (9)

Как видно из рис. 1, все рассмотренные методы расчета ВТХ дают аналогичный характер зависимостей. При этом можно отметить, что почти все формулы, в которых учитывается только объемная концентрация дисперсной фазы, дают очень близкие результаты расчета вязкости. При этом с использованием формулы Эйнштейна получаются немного более низкие значения вязкости, чем по формулам Кургаева, Ванда, Барни и Мирзахи (последние три дают практически неразличимые результаты).

Достаточно хорошо описываются ВТХ саже-масляных суспензий также с помощью модели Кунитца, хотя в ней не учитываются размеры частиц дисперсной фазы (кривая *6* на рис. 1).

Для целей настоящей работы наиболее предпочтительной является модель (11), описанная в работе В.Я. Рудяка [6], поскольку она пригодна для расчетов вязкости суспензий в широком диапазоне значений объемной концентрации дисперсной фазы и учитывает соотношение размеров частиц и молекул дисперсионной среды.

Расчеты, выполненные с использованием модели (11), описанной в работе В.Я. Рудяка [6], показали, что эта модель действительно позволяет рассчитать вязкость саже-масляной суспензии при любых значениях температуры, концентрации частиц дисперсной фазы и соотношении размеров частиц дисперсной фазы и молекул дисперсионной среды (масла).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения применимости модели (11), выбранной после анализа имеющихся в научно-технической литературе и рассмотренных в предыдущем разделе моделей, был проведен ряд экспериментов с приготовлением модельных смесей ММ марки М-14Д$_2$СЕ с различным содержанием сажи N220p пылящей (негранулированной) с последующим определением динамической вязкости. Для приготовления модельных образцов были выбраны массовые концентрации сажи, равные 1, 2, 3, 4, 5 и 7 мас. %. Шаг в 1% выбран для того, чтобы можно было четко увидеть изменение вязкости с ростом концентрации сажи. Значение 5 мас. % загрязнений в работавшем масле обычно являются браковочной нормой, при достижении которой масло по регламенту производителей техники необходимо заменить. Содержание сажи 7 мас. % было выбрано для подтверждения того, что превышение содержания сажи свыше установленной нормы (5 мас. %) негативно влияет на реологические характеристики масла.

На основе экспериментальных данных были получены аппроксимирующие зависимости изменения динамической вязкости масла М-14Д$_2$СЕ с сажей N220 пылящей при концентрациях 1, 2, 3, 4, 5 и 7 мас. % от абсолютной температуры, графики которых представлены на рис. 2. Аналитический вид аппроксимирующих зависимостей и значения коэффициентов *a*, *b* и *c* приведены в табл. 1.

Общим в характере ВТХ образцов масла М-14Д$_2$СЕ с сажей является ожидаемая устойчивая тенденция ко все более заметному смещению вязкостно-температурных кривых вверх по отношению к ВТХ чистого масла по мере увеличения концентрации сажи. Максимальные значения динамической вязкости достигаются при наибольшем содержании сажи в образцах масла — в нашем случае при 7 мас. %.

Зависимость (11), пригодная для расчета динамической вязкости суспензий в широком диапазоне значений объемной концентрации дисперсной фазы и температуры, позволяет учесть, помимо этих параметров, только соотношение размеров частиц сажи и молекул дисперсионной среды (масла). Однако результаты выполненных расчетов показывают, что указанных параметров недостаточно для корректного прогнозирования характера изменения ВТХ масла, загрязненного сажей (рис. 3).

Таблица 1. Параметры аппроксимирующих зависимостей динамической вязкости масла М-14Д$_2$СЕ и суспензий на его основе

Table 1. Parameters of approximating dependencies of the dynamic viscosity of M-14D$_2$SE oil and suspensions based on it

Продукт Product	Коэффициенты зависимостей Dependence coefficients $\mu(T)=\exp\left(\exp\left(a\cdot T^{-4}+b\cdot T^{-2}+c\right)\right)-1$			Коэффициент корреляции Correlation coefficient $\mathrm{corr}\left(\left(T^{-4}+T^{-2}\right),\ln\ln\left(\mu+1\right)\right)$
	a	*b*	*c*	
М-14Д$_2$СЕ M-14D$_2$SE	$-7.31\cdot10^{9}$	$8.60\cdot10^{5}$	−9.84	0.999
М-14Д$_2$СЕ + 1 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 1 wt % N220p	$-3.98\cdot10^{9}$	$7.38\cdot10^{5}$	−8.75	0.999
М-14Д$_2$СЕ + 2 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 2 wt % N220p	$-3.62\cdot10^{8}$	$6.08\cdot10^{5}$	−7.62	0.999
М-14Д$_2$СЕ + 3 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 3 wt % N220p	$2.01\cdot10^{9}$	$5.26\cdot10^{5}$	−6.91	0.999
М-14Д$_2$СЕ + 4 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 4 wt % N220p	$5.93\cdot10^{9}$	$3.71\cdot10^{5}$	−5.49	0.999
М-14Д$_2$СЕ + 5 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 5 wt % N220p	$9.57\cdot10^{9}$	$2.10\cdot10^{5}$	−3.92	0.998
М-14Д$_2$СЕ + 7 мас. % N220p M-14D$_2$SE + 7 wt % N220p	$-7.31\cdot10^{9}$	$8.60\cdot10^{5}$	−9.84	0.999

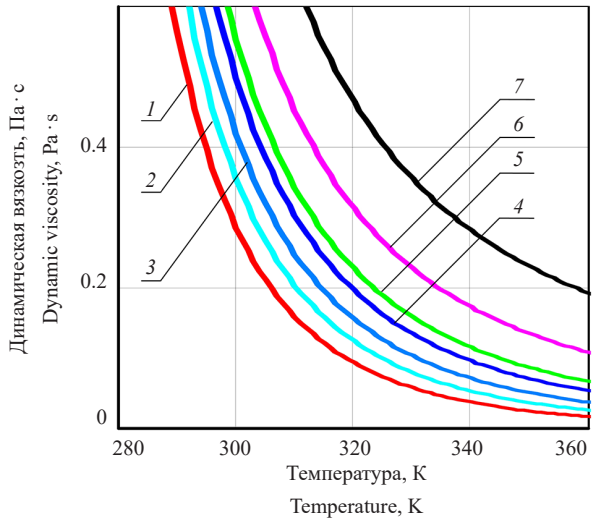

Рис. 2. Аппроксимирующие зависимости динамической вязкости масла М-14Д$_2$СЕ (*1*) от температуры при различных значениях концентрации сажи N220 пылящей: (*2*) масло М-14Д$_2$СЕ + 1% сажи; (*3*) масло М-14Д$_2$СЕ + 2% сажи; (*4*) масло М-14Д$_2$СЕ + 3% сажи; (*5*) масло М-14Д$_2$СЕ + 4% сажи; (*6*) масло М-14Д$_2$СЕ + 5% сажи; (*7*) масло М-14Д$_2$СЕ + 7% сажи

Fig. 2. Approximating dependencies of the dynamic viscosity of M-14D$_2$SE (*1*) oil on temperature at different concentrations of N220 dusty soot: (*2*) M-14D$_2$SE oil + 1% soot; (*3*) M-14D$_2$SE oil + 2% soot; (*4*) M-14D$_2$SE oil + 3% soot; (*5*) M-14D$_2$SE oil + 4% soot; (*6*) M-14D$_2$SE oil + 5% soot; (*7*) M-14D$_2$SE oil + 7% soot

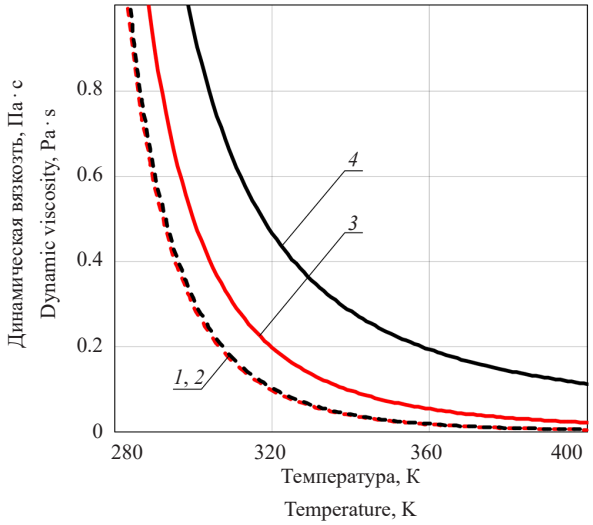

Рис. 3. Результаты расчета динамической вязкости 3- и 7-процентной суспензий сажи N220p в ММ марки М-14Д$_2$СЕ по формуле (11) в сравнении с аппроксимацией экспериментальных данных: (*1*) результаты расчета по формуле (11) с 3% сажи; (*2*) результаты расчета по формуле (11) с 7% сажи; (*3*) масло М-14Д$_2$СЕ + 3% сажи; (*4*) масло М-14Д$_2$СЕ + 7% сажи

Fig. 3. Results of calculating the dynamic viscosity of 3- and 7-percent suspensions of N220p soot in M-14D$_2$SE engine oil according to Eq. (11) in comparison with the approximation of experimental data: (*1*) calculation results using Eq. (11) with 3% soot; (*2*) calculation results using Eq. (11) with 7% soot; (*3*) M-14D$_2$SE oil + 3% soot; (*4*) M-14D$_2$SE oil + 7% soot

Очевидно, это связано с тем, что зависимость вида (11) не учитывает, во-первых, что сажа присутствует в масле в основном в виде первичных агрегатов (агрегаты образуются в газовой фазе, а потом уже захватываются маслом) и, во-вторых, что агрегаты сажи содержат абсорбированное масло. В связи с последним обстоятельством при расчетном определении вязкости суспензий сажи в ММ необходимо рассматривать, главным образом, достаточно крупные частицы с размерами, соответствующими размерам агрегатов сажи, а при определении объемной концентрации дисперсной фазы необходимо учитывать, что часть дисперсионной среды, сопоставимая по объему с объемом сажи, переходит в состав дисперсной фазы.

Среднее значение эффективного диаметра частиц рассматриваемой в настоящей работе модельной сажи (негранулированного технического углерода марки N220), обозначаемой N220p, составляет 32 нм, а их первичных агрегатов 103 нм [15].

Если не учитывать абсорбцию масла агрегатами сажи, то зависимость динамической вязкости суспензий сажи в масле, полученная на основе формулы (11), имеет вид:

$$\mu_{s9}(g,T)=\mu_0(T)\times$$
$$\times\left\{\left[1+2.5f_{ns}c_{DP}(g,T)+6.2f_{ns}^2c_{DP}(g,T)^2\right]+\right.$$
$$\left.+\left[5.25f_{ns}^2c_{DP}(g,T)^2+40.94f_{ns}^4c_{DP}(g,T)^4\right]\times\right.$$
$$\left.\times\exp\left(-0.208\frac{D}{d}\right)\right\}, \quad (14)$$

где g — массовая концентрация сажи в суспензии в долях единицы; T — абсолютная температура, К; $\mu_0(T)$ — динамическая вязкость чистого масла, Па·с (общий вид зависимости $\mu(T)$ и значения коэффициентов a, b, c представлены на рис. 1 и 2 и в табл. 1 соответственно); f_{ns} — коэффициент несферичности первичных агрегатов сажевых частиц, учитывающий соотношение большой и малых осей области пространства, занятой средним агрегатом; D — среднее значение эффективного диаметра агрегатов, нм (для сажи N220p в соответствии с данными [15, 16, [3]] D = 103 нм); d — характерное значение линейных размеров молекул дисперсионной среды (dispersion medium, DM), принимаемое равным 1.5 нм; $c_{DP}(g,T)$ — объемная концентрация сажи в суспензии, рассчитываемая по формуле:

$$c_{DP}(g,T)=\frac{g\cdot\rho_{DM}(T)}{g\cdot\rho_{DM}(T)+(1-g)\rho_{DP}}, \quad (15)$$

в которой ρ_{DP} — плотность материала дисперсной фазы (dispersed phase, DP) (сажи), принимаемая равной 1850 кг/м^3; $\rho_{DM}(T)$ — зависимость плотности дисперсионной среды от температуры:

$$\rho_{DM}(T)=1019-0.661\cdot T. \quad (16)$$

Расчеты, выполненные по формуле (14) и представленные на рис. 4, свидетельствуют о неудовлетворительном соответствии их результатов экспериментальным данным, полученным с помощью ротационного вискозиметра.

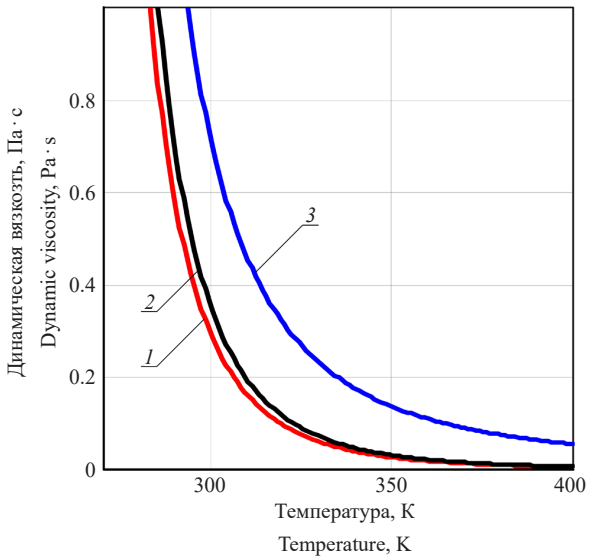

Рис. 4. Результаты расчета динамической вязкости 5-процентной суспензии сажи N220p в ММ марки М-14Д$_2$СЕ по формуле (14) в сравнении с аппроксимацией экспериментальных данных: (*1*) масло М-14Д$_2$СЕ; (*2*) результаты расчета по формуле (14); (*3*) масло М-14Д$_2$СЕ + 5% сажи

Fig. 4. Results of the calculation of the dynamic viscosity of a 5-percent suspension of N220p soot in M-14D$_2$SE engine oil according to Eq. (14) in comparison with the approximation of experimental data: (*1*) M-14D$_2$SE oil; (*2*) calculated value according to Eq. (14); (*3*) M-14D$_2$SE oil + 5% soot

Одной из причин такого результата, очевидно, является то, что формула (14) не учитывает структурность сажи, которая обычно характеризуется таким показателем как абсорбция дибутилфталата (dibutyl phthalate) k_{DBP}, см^3/100 г сажи. Значение этого показателя практически равно количеству (объему) масла, поглощаемому первичными агрегатами сажи и таким образом выведенному из состава дисперсионной среды, что приводит к увеличению объемной концентрации дисперсной фазы в суспензии тем большему, чем выше значение k_{DBP}.

[3] Раздьяконова Г. И. *Дисперсный углерод.* Учебное электронное издание локального распространения. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 231 с. [Razdiakonova G.I. *Dispersed carbon.* An educational electronic publication of local distribution. Omsk: OmSTU, 2013. 231 p.]

В этом случае объемная концентрация дисперсной фазы равна

$$c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)=\frac{g\cdot\left[1+\rho_{\mathrm{DP}}K_{\mathrm{DBP}}\right]\rho_{\mathrm{DM}}\left(T\right)}{g\cdot\rho_{\mathrm{DM}}\left(T\right)+\left(1-g\right)\cdot\rho_{\mathrm{DP}}}, \quad (17)$$

где $K_{\mathrm{DBP}} = k_{\mathrm{DBP}} \cdot 10^{-5}$, м^3/кг.

С учетом (17) формула (14) приобретает иной вид:

$$\begin{aligned}&\mu_{s10}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)=\mu_0\left(T\right)\times\\&\times\left\{\left[1+2.5f_{\mathrm{ns}}c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)+\right.\right.\\&\left.+6.2f_{\mathrm{ns}}^2c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^2\right]+\\&+\left[5.25f_{\mathrm{ns}}^2c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^2+\right.\\&\left.\left.+40.94f_{\mathrm{ns}}^4c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^4\right]\exp\left(-0.208\frac{D}{d}\right)\right\}.\end{aligned} \quad (18)$$

Следует отметить, что при массовой концентрации сажи в суспензии g = 0.05 объемная концентрация, рассчитанная по формуле (15) при температуре 293 К, составляет 0.023, а по формуле (17) в случае масла М-14Д$_2$СЕ (K_{DBP} = 115 см^3/100 г) она равна 0.072, что обуславливает большую, чем по формуле (14), близость получаемых значений вязкости к измеренным экспериментально (рис. 5).

Однако все равно расчетные значения динамической вязкости масла, полученные по формуле (18), далеки от экспериментальных. Аналогичные расхождения были получены и для других значений массовой концентрации сажи в суспензии (от 0.01 до 0.07).

Ввиду указанного была предпринята попытка учесть влияние на вязкость суспензий формы первичных агрегатов сажи, которая в случае N220p, согласно данным электронной микроскопии, приведенным в [15, 17], далека от сфероидальной и эллипсоидальной и является разветвленной со средним числом частиц сажи в агрегатах, равным 33.

Исходя из того, что первичные агрегаты сажи N220p по размерам можно отнести к категории броуновских частиц, которые из-за разветвленной формы оказывают более высокое сопротивление сдвиговому движению дисперсионной среды, чем частицы сферической формы, формула (18) была преобразована путем введения в нее дополнительного комплексного параметра $K(T)$:

$$\begin{aligned}&K\left(T,K_{\mathrm{DBP}}\right)=\left(\frac{K_{\mathrm{DBP}}}{30}\right)\cdot\left(\frac{T}{T_{\mathrm{cr}}}\right)^{0.6}\times\\&\times\left\{\exp\left[-\left(\frac{273}{T}\right)^3\right]\right\}^{0.8},\end{aligned} \quad (19)$$

где T_{cr} — температура застывания масла (для М-14Д$_2$СЕ T_{cr} = 261 К).

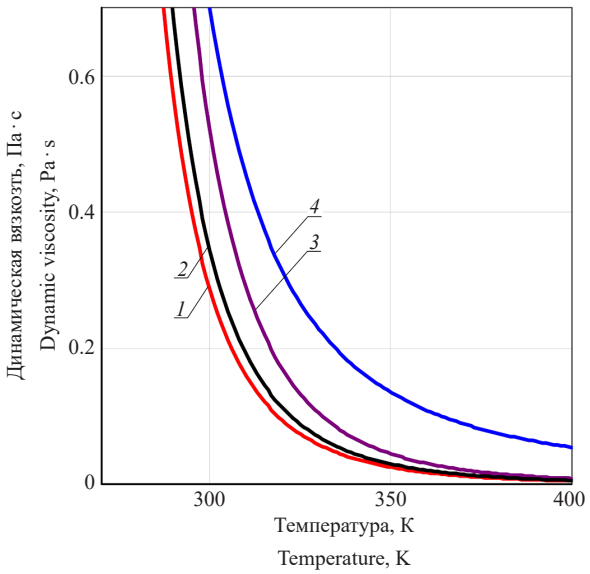

Рис. 5. Результаты расчета динамической вязкости 5-процентной суспензии сажи N220p в ММ марки М-14Д$_2$СЕ по формулам (14) и (18) в сравнении с аппроксимацией экспериментальных данных:
(*1*) масло М-14Д$_2$СЕ;
(*2*) результаты расчета по формуле (14);
(*3*) результаты расчета по формуле (18);
(*4*) масло М-14Д$_2$СЕ + 5% сажи

Fig. 5. Results of calculating the dynamic viscosity of a 5-percent suspension of N220p soot in M-14D$_2$SE engine oil according to Eqs. (14) and (18) in comparison with the approximation of experimental data:
(*1*) M-14D$_2$SE oil;
(*2*) calculated value according to Eq. (14);
(*3*) calculated value according to Eq. (18);
(*4*) M-14D$_2$SE oil + 5% soot

Формула расчета динамической вязкости при этом имеет вид:

$$\begin{aligned}&\mu_{s11}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)=\mu_0\left(T\right)\times\\&\times\left\{\left[\left(K\left(T,K_{\mathrm{DBP}}\right)\right)^2\cdot\left(c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)\right)^{0.3}+\right.\right.\\&+2.5f_{\mathrm{ns}}c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)+\\&\left.+6.2f_{\mathrm{ns}}^2c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^2\right]\\&+\left[5.25f_{\mathrm{ns}}^2c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^2+\right.\\&\left.\left.+40.94f_{\mathrm{ns}}^4c_{\mathrm{DP}}\left(g,T,K_{\mathrm{DBP}}\right)^4\right]\exp\left(-0.208\frac{D}{d}\right)\right\}.\end{aligned} \quad (20)$$

Результаты расчета динамической вязкости масел по формуле (20), представлены на рис. 6.

Взаимное расположение ВТХ суспензий сажи, полученных расчетом по формуле (20), и аппроксимирующих зависимостей, полученных в результате обработки экспериментальных данных методами регрессионного анализа, свидетельствует

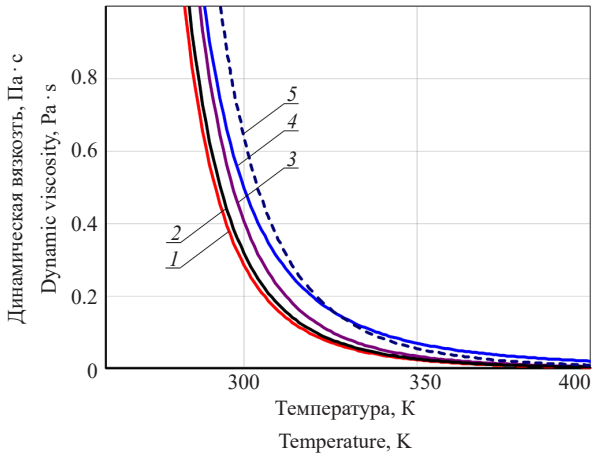

Рис. 6. Результаты расчета динамической вязкости 5-процентной суспензии сажи N220p в ММ марки М-14$Д_2$СЕ по формулам (14), (18) и (20) в сравнении с аппроксимацией экспериментальных данных: (*1*) масло М-14$Д_2$СЕ; (*2*) результаты расчета по формуле (14); (*3*) результаты расчета по формуле (18); (*4*) масло М-14$Д_2$СЕ + 5% сажи; (*5*) результаты расчета по формуле (20)

Fig. 6. Results of calculating the dynamic viscosity of a 5-percent suspension of N220p soot in M-14D_2SE engine oil according to Eqs. (14), (18), and (20) in comparison with the approximation of experimental data: (*1*) M-14D_2SE oil; (*2*) calculated value according to Eq. (14); (*3*) calculated value according to Eq. (18); (*4*) M-14D_2SE oil + 5% soot; (*5*) calculated value according to Eq. (20)

о достаточно высокой достоверности прогнозирования вязкости масел, загрязненных сажей, с помощью формулы (20).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют, что для адекватного описания ВТХ ММ, содержащих сажу, необходимо учитывать характеристики структуры первичных агрегатов сажевых частиц. Разработанная математическая модель ВТХ масел в виде зависимости их динамической вязкости от температуры, массовой концентрации сажи, плотности материала частиц, степени несферичности агрегатов, соотношения размеров частиц дисперсной фазы (агрегатов или одиночных частиц неагрегированной сажи) и молекул масла, а также структурности сажи, характеризуемой таким стандартным показателем как адсорбция дибутилфталата, позволяет с достаточно высокой достоверностью прогнозировать ВТХ масел, загрязненных сажей, образующейся в процессе эксплуатации дизелей.

Вклад авторов

А.В. Лесин — планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка результатов испытаний, подготовка полученных данных к публикации.

А.В. Исаев — постановка задач, планирование экспериментальных исследований, теоретические исследования влияния характеристик дисперсной фазы на вязкость суспензий, подготовка полученных данных к публикации.

Б.П. Тонконогов — постановка задач, обработка полученных данных, подготовка полученных данных к публикации.

С.В. Дунаев — постановка задач, планирование экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка полученных данных к публикации.

А.Б. Куликов — постановка задач, планирование экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка полученных данных к публикации.

Authors' contributions

A.V. Lesin — planning and conducting experimental studies, processing test results, preparing the data obtained for publication.

A.V. Isaev — setting objectives, planning the experimental studies, theoretical studies of dispersed phase characteristics effect on the viscosity of suspensions, preparing the data obtained for publication.

B.P. Tonkonogov — setting objectives, processing the data obtained, preparing of the data obtained for publication.

S.V. Dunaev — setting objectives, planning the experimental studies, processing the data obtained, preparing the data obtained for publication.

A.B. Kulikov — setting objectives, planning the experimental studies, processing the data obtained, preparing the data obtained for publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов И.Г. и др. *Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение*: справочник; под ред. В.М. Школьникова. М.: Издательский центр «Техинформ»; 1999. 596 с. ISBN 5-89551-006-X
2. Матвеенко В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем. *Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия.* 2011;52(4):243–276.
3. Бретшнайдер С. *Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета*: пер. с польск. М., Л.: Химия; 1966. 535 с.
4. Келбалиев Г.И., Расулов Р.С., Тагиев Д.Б. *Механика и реология нефтяных дисперсных систем*. М.: Маска; 2017. 462 с.

REFERENCES

1. Anisimov I.G., *et al. Topliva, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primenenie* (*Fuels, Lubricants, Technical Fluids. Assortment and Application*). Shkolnikov V.M. (Ed.). Moscow: Tekhinform; 1999. 596 p. (in Russ.). ISBN 5-89551-006-X
2. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. The viscosity and structure of dispersed systems. *Moscow Univ. Chem. Bull*. 2011;66(4): 199–228. https://doi.org/10.3103/S0027131411040079 [Original Russian Text: Matveenko V.N., Kirsanov E.A. The viscosity and structure of dispersed systems. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Khimiya*. 2011;52(4):243–246 (in Russ.).]

5. Пилов П.И. *Гравитационная сепарация полезных ископаемых*. Днепропетровск: Национальный горный университет; 2003. 123 с.
6. Рудяк В.Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика*. 2015;10(1):5–22.
7. Batchelor G.K. Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction. *J. Fluid Mechanics.* 1976;74(1): 1–29. https://doi.org/10.1017/S0022112076001663
8. Школьников Е.И., Григоренко А.В., Липатова И.А., Кумар В., Власкин М.С. Влияние примеси метана при разложении ацетилена на размер и морфологию частиц образующейся сажи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2023;2(107):110–125. https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-110-125
9. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Козлов А.Н. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019;25(1):47–59. https://doi.org/10.18721/JEST.25105
10. Науменко О.Ф., Юр Г.С. Результаты численного исследования процесса обдува взвешенных частиц дизельной сажи возмущенной газовой средой. *Ползуновский вестник*. 2006;4:128–130.
11. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оптические параметры частиц сажи и характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизеля. *Вестник Тихоокеанского государственного университета* (*Вестник ТОГУ*). 2014;2(33):133–140.
12. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Наноструктуры частиц дизельной сажи. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2015;36: 86–92.
13. Шурупов С.В. Закономерности образования дисперсного углерода при изотермическом пиролизе углеводородного сырья. *Газохимия*. 2009;9:64–72.
14. Юрлов А.С. Физические свойства, состав и структура частиц сажи, образующихся в цилиндре дизельного двигателя. *Вестник Вятского ГАТУ*. 2023;4(18):253–261.
15. Гюльмисарян Т.Г., Капустин В.М., Левенберг И.П. *Технический углерод: морфология, свойства, производство*. М.: Изд-во «Каучук и резина»; 2017. 586 с.
16. Раздьяконова Г.И., Лихолобов В.А., Кохановская О.А. *Технологии модификации технического углерода*: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ; 2017. 160 с. ISBN 978-5-8149-2437-7
17. Стебелева О.П., Кашкина Л.В., Вшивкова О.А. Структура и морфология сажевых частиц, образующихся при испарении водных суспензий. *Российские нанотехнологии*. 2022;17(4):465–471. https://doi.org/10.56304/S1992722322040252

3. Bretshnaider S. *Svoistva gazov i zhidkostei. Inzhenernye metody rascheta* (*Properties of Gases and Liquids. Engineering Calculation Methods*). Transl. from Polish. Moscow, Leningrad: Khimiya; 1966. 535 p. (in Russ.). [Bretsznajder S. *Wlasności Gazów i Cieczy*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 1962. 739 p.]
4. Kelbaliev G.I., Rasulov R.S., Tagiev D.B. *Mekhanika i reologiya neftyanykh dispersnykh system* (*Mechanics and Rheology of Petroleum Dispersed Systems*). Moscow: Maska; 2017. 462 p. (in Russ.).
5. Pilov P.I. *Gravitatsionnaya separatsiya poleznykh iskopaemykh* (*Gravity Separation of Minerals*). Dnepropetrovsk; 2003. 123 p. (in Russ.).
6. Rudyak V.Ya. Morden status of researches on nanofluids viscosity. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika = Vestnik NSU. Series: Physics*. 2015;10(1):5–22 (in Russ.).
7. Batchelor G.K. Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction. *J. Fluid Mechanics.* 1976;74(1): 1–29. https://doi.org/10.1017/S0022112076001663
8. Shkolnikov E.I., Grigorenko A.V., Lipatova I.A., Kumar V., Vlaskin M.S. Methane Impurity Effect in the Acetylene Decomposition on Size and Morphology of the Appearing Soot Particles. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2023;2(107): 110–125 (in Russ.). http://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-110-125
9. Likhanov V.A., Lopatin O.P., Kozlov A.N. Modeling soot formation in cylinder of diesel engine. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2019;25(1):47–59 (in Russ.). https://doi.org/10.18721/JEST.25105
10. Naumenko O.F., Yur G.S., Results of a numerical study of the process of blowing suspended particles of diesel soot in a disturbed gas environment. *Polzunovskiy Vestnik.* 2006;4: 128–130 (in Russ.).
11. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Optical Parameters of Soot Particles and Parameters of Radiative Heat Exchange in Diesel Engine Combustion Chamber. *Vestnik TOGU = Bulletin of PNU*. 2014;2(33):133–140 (in Russ.).
12. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Diesel soot of nanostructure particles. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza = Scientific Journal of DALRYBVTUZ*. 2015;36:86–92 (in Russ.).
13. Shurupov S.V. Regularities of formation of dispersed carbon during isothermal pyrolysis of hydrocarbon raw materials. *Gazokhimiya.* 2009;9:64–72 (in Russ.).
14. Yurlov A.S. Physical properties, composition and structure of soot particles formed in the diesel engine cylinder. *Vestnik Vyatskogo GATU = Bulletin of Vyatka State Agrarian University*. 2023;4(18):253–261 (in Russ.).
15. Gyulmisaryan T.G., Kapustin V.M., Levenberg I.P. *Tekhnicheskii uglerod: morfologiya, svoistva, proizvodstvo* (*Carbon Black: Morphology, Properties, Production*). Moscow: Kauchuk i rezina; 2017. 586 p. (in Russ.).
16. Razdiakonova G.I., Likholobov V.A., Kohanovskaya O.A. *Tekhnologii modifikatsii tekhnicheskogo ugleroda* (*Carbon Black Modification Technologies*): monograph. Omsk: OmSTU; 2017. 160 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8149-2437-7
17. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Vshivkova O.A. Structure and morphology of carbon-black particles formed during the evaporation of aqueous suspensions. *Nanotechnol. Russia*. 2022;17(4):489–494. https://doi.org/10.1134/s2635167622040255

[Original Russian Text: Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Vshivkova O.A. Structure and morphology of carbon-black particles formed during the evaporation of aqueous suspensions. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2022;17(4):465–471 (in Russ.). https://doi.org/10.56304/S1992722322040252]

Об авторах

Лесин Анатолий Викторович, научный сотрудник, ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Российская академия наук (ИНХС РАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 29). E-mail: lesinav@ips.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 7729-5478, https://orcid.org/0000-0002-1686-8125

Исаев Александр Васильевич, д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Российская академия наук (ИНХС РАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 29). E-mail: a_isaev@ips.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 7271-4416, https://orcid.org/0009-0004-7139-7524

Тонконогов Борис Петрович, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой химии и технологии смазочных материалов и химмотологии, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина» (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 65, корп. 1). E-mail: bpt734@gmail.com. Scopus Author ID 6506284001, ResearcherID B-7698-2018, https://orcid.org/0000-0003-1141-0120

Дунаев Сергей Васильевич, к.воен.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Российская академия наук (ИНХС РАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 29). E-mail: dunaevsv@ips.ac.ru. SPIN-код РИНЦ 1969-5765, https://orcid.org/0000-0001-6939-8713

Куликов Альберт Борисович, к.х.н., заместитель директора, ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Российская академия наук (ИНХС РАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 29). E-mail: akulikov@ips.ac.ru. Scopus Author ID 7103153889, ResearcherID A-8738-2014, SPIN-код РИНЦ 3258-4823, https://orcid.org/0000-0003-1756-282X

About the authors

Anatoly V. Lesin, Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS) (29, Leninskii pr., Moscow, 119991, Russia). E-mail: lesinav@ips.ac.ru. RSCI SPIN-code 7729-5478, https://orcid.org/0000-0002-1686-8125

Alexander V. Isaev, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS) (29, Leninskii pr., Moscow, 119991, Russia). E-mail: a_isaev@ips.ac.ru. RSCI SPIN-code 7271-4416, https://orcid.org/0009-0004-7139-7524

Boris P. Tonkonogov, Dr. Sci. (Chem.)**,** Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Lubricants and Chemmotology, Gubkin University (65/1, Leninskii pr., Moscow, 119991, Russia). E-mail: bpt734@gmail.com. Scopus Author ID 6506284001, ResearcherID B-7698-2018, https://orcid.org/0000-0003-1141-0120

Sergey V. Dunaev, Cand. Sci. (Mil.), Leading Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS) (29, Leninskii pr., Moscow, 119991, Russia). E-mail: dunaevsv@ips.ac.ru. RSCI SPIN-code 1969-5765, https://orcid.org/0000-0001-6939-8713

Albert B. Kulikov, Cand. Sci. (Chem.), Deputy Director, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS) (29, Leninskii pr., Moscow, 119991, Russia). E-mail: akulikov@ips.ac.ru. Scopus Author ID 7103153889, ResearcherID A-8738-2014, RSCI SPIN-code 3258-4823, https://orcid.org/0000-0003-1756-282X