

---

## НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

---

УДК 621.892

### ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛНОФОРМУЛЬНОГО СМАЗОЧНОГО МАСЛА, ЛЕГИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОДОБАВКАМИ

© 2024 г. А. Ю. Албагачиев<sup>1</sup>, И. А. Буяновский<sup>1</sup>,  
А. Б. Мухтарова<sup>1,\*</sup>, В. Д. Самусенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: aygerim.tokhmetova@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2024 г.

После доработки 01.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

В настоящей статье проведено сравнительное исследование температурной стойкости полноформульного моторного масла Mobil Ultra SAE10W-40, легированного двумя углеродными нанодобавками (нанотрубками и фуллеренами). Предварительно установлены оптимальные по коэффициентам трения концентрации содержания сравниваемых нанодобавок, а также оптимальные концентрации по количеству выделяемого тепла при трении. Установлено, что легирование исследуемого масла фуллереном повышает критическую температуру на 10–15 °С, легирование этого масла углеродными нанотрубками повышает критическую температуру на 20–25 °С.

*Ключевые слова:* моторное масло, фуллерен C<sub>60</sub>, углеродные нанотрубки, критическая температура, коэффициент трения, четырехшариковая машина

**DOI:** 10.31857/S0235711924060033, **EDN:** NPALLC

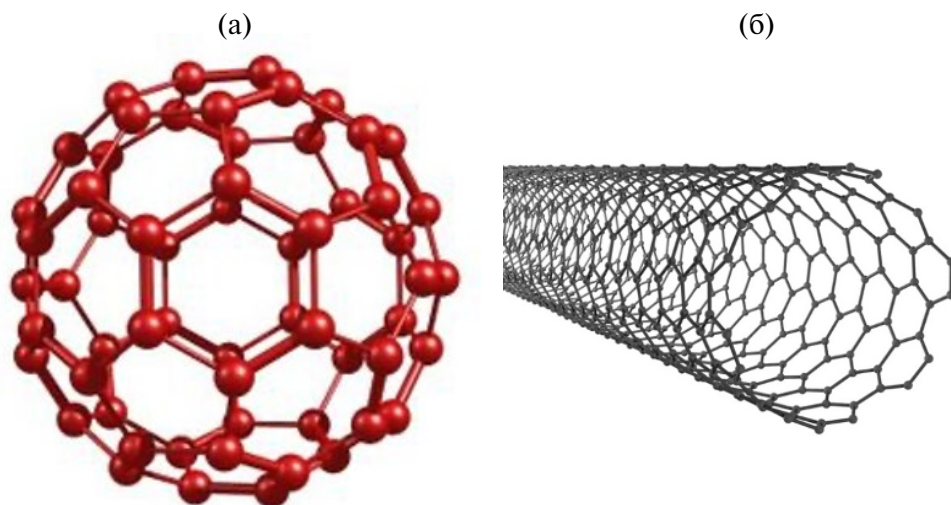
Как известно, наиболее распространенным методом обеспечения необходимой надежности и долговечности подвижных сопряжений машин и механизмов, а также минимизации энергетических потерь при их эксплуатации является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов — и прежде всего жидких смазочных материалов (масел). Эти масла представляют собой основу (базовое масло) нефтяного, синтетического, растительного или смешанного происхождения и так называемые присадки — продукты, придающие смазочному материалу те или иные служебные свойства (антикоррозионные, антидетонационные, диспергирующие, моющие, антиокислительные, вязкостные и другие присадки). Значительную долю от состава смазочных композиций (для моторных масел содержание присадок может варьироваться от 5 до 25%) составляют трибологически активные присадки: противоизносные, антифрикционные, противозадирные. В состав этих присадок входят такие элементы, как сера, фосфор, хлор и или их сочетания, которые при повышенных температурах оказывают коррозионное воздействие на цветные металлы, фосфор отравляет катализаторы очистки выхлопных газов, способствуя ухудшению экологической обстановки [1, 2]. Поскольку имеет место характерная для настоящего времени тенденция ужесточения режимов трения смазываемых трибосопряжений машин и механизмов, появилась необходимость повыше-

ния смазочной способности масел, смазывающих эти трибосопряжения. Обеспечить это повышение путем увеличения концентрации трибологически активных присадок может оказаться контрпродуктивным, поскольку это приведет к интенсификации проявления упомянутых выше нежелательных эффектов. Эффективным путем обеспечения высокой смазочной способности маслам без повышения содержания серы и фосфора в моторных маслах может явиться замена (полная или частичная) присадок, содержащих эти элементы, на микро/нанодобавки некоторых нерастворимых материалов которые заметно повышают смазочную способность масел, не оказывая влияния на проявляющуюся по мере увеличения их концентрации в маслах коррозионное действие и повышение негативного влияния на экологию. Значительную эффективность смазочного действия в различных жидких средах показали при этом микро- и нанодобавки ряда металлов, геомодификаторов, твердых смазочных материалов и т. д. [3–5]. Полученные в конце XX–начале XXI вв. углеродные наноструктуры фуллерены и углеродные нанотрубки [6–9], будучи введенными в различные смазочные среды (нефтяные, полусинтетические и растительные масла в качестве трибологически активных нанодобавок, значительно повышают термостабильность смазочных композиций, расширяют рабочий интервал контактных давлений и температур в узлах трения и сокращают время приработки контактирующих тел.

Температурная стойкость смазочных материалов характеризуется величиной их критической температуры при трении. Начиная с этой температуры возрастает коэффициент трения и разрушения смазочного слоя между контактирующими поверхностями. Поэтому была исследована критическая температура смазочных материалов с нанодобавками на маслоиспытательной машине КТ-2 [10].

**Целью** статьи является выявление влияния легирования полноформульного моторного масла Mobil Ultra SAE10W-40 фуллереном  $C_{60}$  и нанотрубками (УНТ) на его температурную стойкость при трении [10].

**Материалы и методика исследования.** В качестве исследуемой смазочной среды выбрано полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra SAE10W-40. В качестве нанодобавок были выбраны наноструктуры фуллерен  $C_{60}$  производства Merk KGaA (рис. 1а) и углеродные нанотрубки длиной 5 мкм, диаметром  $(1.6 \pm 0.4)$  нм производства Ocsial (рис. 1б).



**Рис. 1.** Исследуемые углеродные нанодобавки: (а) — фуллерен  $C_{60}$ ; (б) — однослойная нанотрубка.

Исследуемые нанодобавки вводятся в масло Mobil Ultra SAE10W-40 путем интенсивного механического перемешивания, а затем — 10-минутного перемешивания с помощью ультразвукового диспергатора. В результате была получена достаточно устойчивая суспензия при концентрациях до 2 мас. % фуллерена в исследуемом масле, но при тех же условиях удалось получить суспензию в этом же масле только до 1 мас. % УНТ, что соответствовало данным авторов [5, 7].

В целях выбора концентраций нанодобавок к исследуемому маслу Mobil Ultra SAE10W-40 для последующей оценки температурной стойкости исследуемых композиций, предварительно на универсальной машине трения УМТ-1 [11] по схеме трения «втулка—втулка», при скорости относительного перемещения 1.5 м/с и нагрузках  $N$  на узел трения 80 и 200 Н с помощью программы Labview были оценены величины зависимости коэффициента трения  $f$  (рис. 2а, 3а) и фрикционного подъема температуры масла  $T_f$  (рис. 2б, 3б) от концентрации твердых нанодобавок в исследуемом масле.

С ростом концентрации фуллерена  $C_{60}$  и УНТ при нагрузке 80 Н коэффициент трения снижается примерно в 2.3 раза, при нагрузке 200 Н коэффициент трения

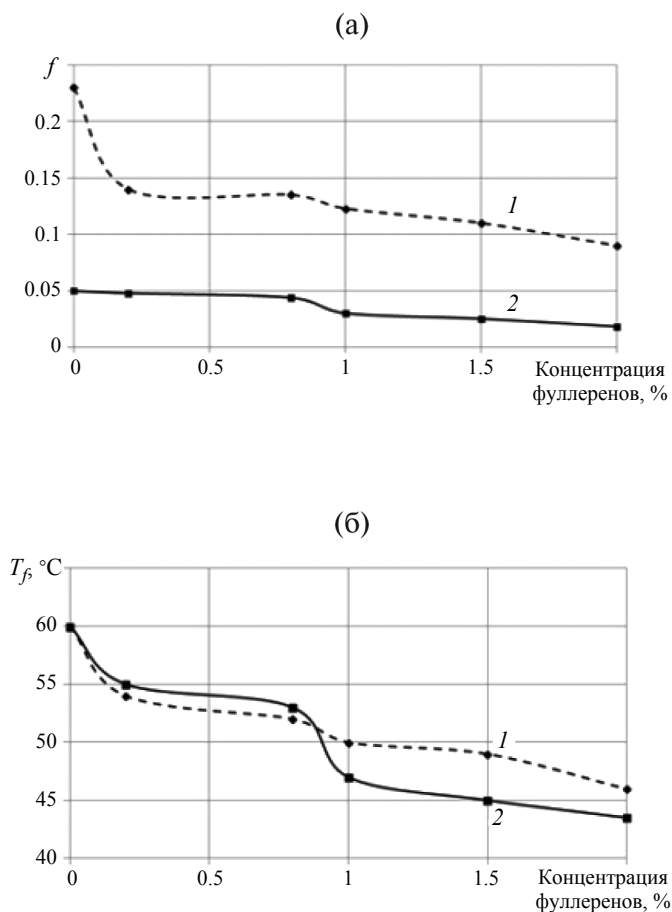


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (а) и температуры смазочного слоя (б) от концентрации фуллерена: 1 —  $N = 80$  Н; 2 —  $N = 200$  Н.

снижается примерно в 2 раза (рис. 2а, 3а). Отметим, что при росте нагрузки с 80 до 200 Н коэффициент трения снижается в среднем в 5 раз.

Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации твердых добавок в исследуемом масле приведена на (рис. 2б, 3б). Как видно из рисунка, увеличение концентрации фуллерена и углеродных нанотрубок приводит к снижению температуры смазочного слоя в зоне контакта. Температура в зоне контакта снизилась в среднем на 18 °С по сравнению с маслом без добавок.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 2, 3 свидетельствуют, что увеличение концентрации обеих углеродных нанодобавок в исследуемом масле обеспечивает снижение коэффициента трения и температуры, генерируемой в трибологическом контакте. Таким образом, в последующих экспериментах, которые проводятся температурным методом на машине КТ-2, в это масло вводят максимально возможное содержание как фуллерена (2 мас. %), так и углеродных нанотрубок (1 мас. %).

Температурный метод оценки смазочной способности масел создан на основании постулата Блока, согласно которому при трении в режиме граничной смазки разрушение смазочного слоя, приводящее к заеданию трибосопряжения, реализу-

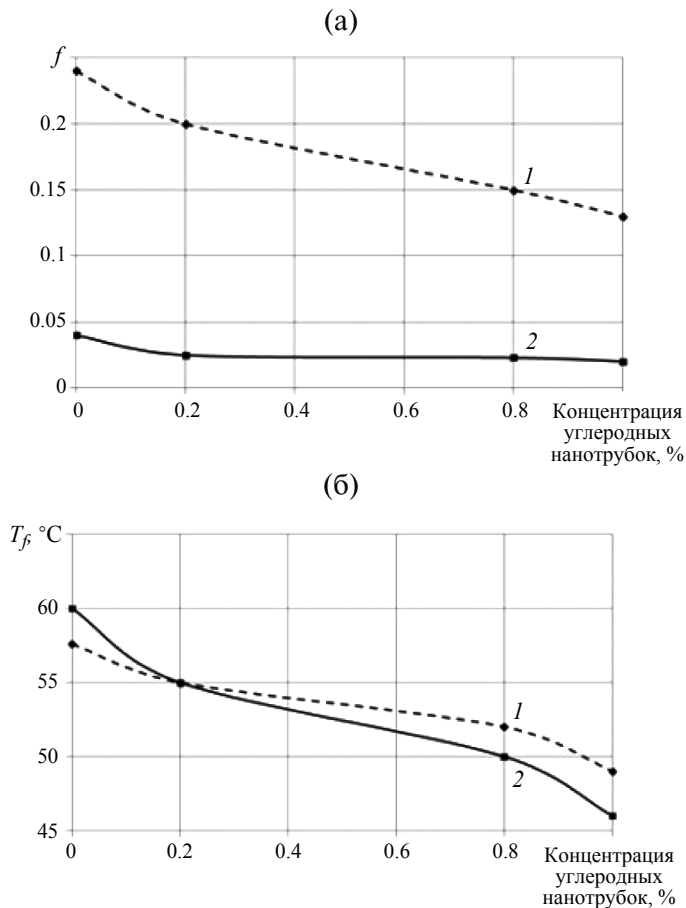


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения (а) и температуры смазочного слоя (б) от концентрации углеродных нанотрубок: 1 —  $N = 80$  Н; 2 —  $N = 200$  Н.

ется при превышении критической температуры, которая не зависит от способа ее достижения (повышение нагрузки на узел трения, скорости относительного перемещения трущихся тел или при объемном нагреве от внешнего источника тепла). Поэтому испытания смазочных материалов температурным методом проводятся при минимальной скорости относительного перемещения трущихся тел, постоянной и достаточно малой нагрузке (хотя и при высоком давлении вследствие геометрии контакта), так что фрикционный нагрев при испытании незначителен, а нагрев узла трения от внешнего источника тепла контролируется. О достижении критической температуры свидетельствует резкое возрастание коэффициента трения.

Температурная стойкость при трении оценивается по величине критической температуры по ГОСТ 23.221–84 на машине КТ-2 (рис. 4) [10].

Образцами для испытаний служат стандартные шарики диаметром 8 мм из стали 100Cr6 (аналог стали ШХ-15); коэффициент трения оценивается по моменту трения, измеряемому торсионным динамометром. Осевая нагрузка на узел трения 110 Н, скорость относительного перемещения 0.28 мм/с, скорость нагрева узла трения от нагревателя  $\sim 5^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Температурный интервал, в котором проводится оценка температурной стойкости масла 30–300  $^\circ\text{C}$ , измерение коэффициента трения проводят через 10–20  $^\circ\text{C}$ . Для каждого исследуемого материала испытания проводят три раза. Зависимость коэффициента трения от температуры смазочной композиции строят по средним арифметическим значениям.

**Описание эксперимента и обсуждение результатов.** Температурным методом по ГОСТ 23.221–84 была оценена температурная стойкость трех смазочных композиций: масла Mobil Ultra SAE10W-40, того же масла с добавкой 2 мас. % фуллерена  $\text{C}_{60}$  и того же масла с добавкой 1 мас. % УМТ, поскольку согласно авторам работ именно при таких концентрациях достигается оптимальная смазочная способность для сравниваемых суспензионных композиций.

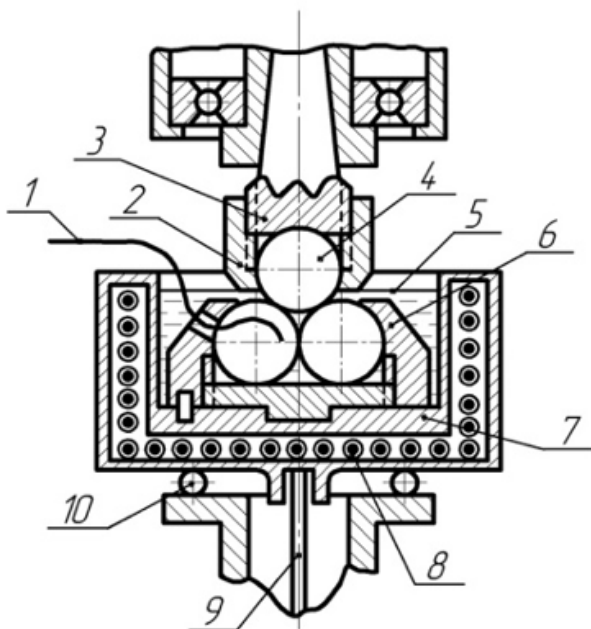


Рис. 4. Схема узла трения четырехшариковой машины КТ-2:

- 1 — термопара; 2 — накладная гайка; 3 — конус шпинделя; 4 — шарик; 5 — верхний уровень масла;  
6 — оправка в сборе; 7 — корпус нагревателя; 8 — спираль нагревателя;  
9 — торсионный динамометр; 10 — опорный подшипник.

Результаты исследования приведены на рис. 5 в виде зависимостей коэффициентов трения  $f$  от температуры  $T$ . Как видно из этого рисунка, в интервале температур от комнатной до критической температуры, при превышении которых резко возрастает коэффициент трения, наблюдаются коэффициенты трения, практически постоянные во всем температурном интервале (исключая некоторое местное повышение трения при температурах 120–170 °С на кривой 2. Практически на всем температурном диапазоне испытаний минимальные коэффициенты трения (порядка 0.09) были получены для суспензии УНТ в исследуемом масле (рис. 5, кривая 3). Для этой же смазочной композиции была получена максимальная критическая температура — порядка 215 °С, т. е. на 20–25 °С выше, чем критическая температура того же масла без нанодобавок. Несколько повышает критическую температуру базового масла добавка фуллерена, но на всем температурном диапазоне испытаний фуллерен не оказывает заметного улучшения смазочного действия: коэффициент трения в его суспензии в основном составляет ~0.10, а при температурах 120–170 °С увеличивается еще выше.

Из результатов испытаний (рис. 6) можно сделать вывод, что диаметр пятна износа после испытаний исследуемого масла составляет 249 мкм, исследуемого масла с 2 мас. % фуллерена — 262 мкм, исследуемого масла с 1 мас. % УНТ — 255 мкм. Влияние нанодобавок на несколько мкм увеличивает диаметр пятна износа.

Таким образом, оценка температурной стойкости трех исследуемых смазочных композиций не показала заметного увеличения смазочной способности этого масла

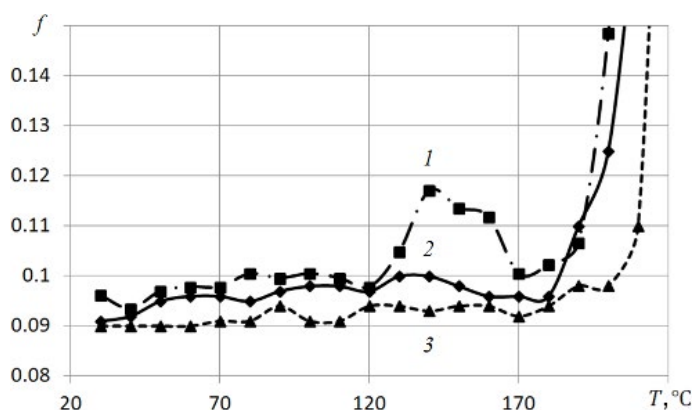


Рис. 5. Зависимости коэффициентов трения от температур контактирующих тел и окружающего их слоя масла при испытаниях по ГОСТ 23.221–84 масла Mobil Ultra SAE10W-40 (кривая 2), того же масла + 2 мас. % фуллерена (кривая 1) и того же масла + 1 мас. % УНТ (кривая 3).

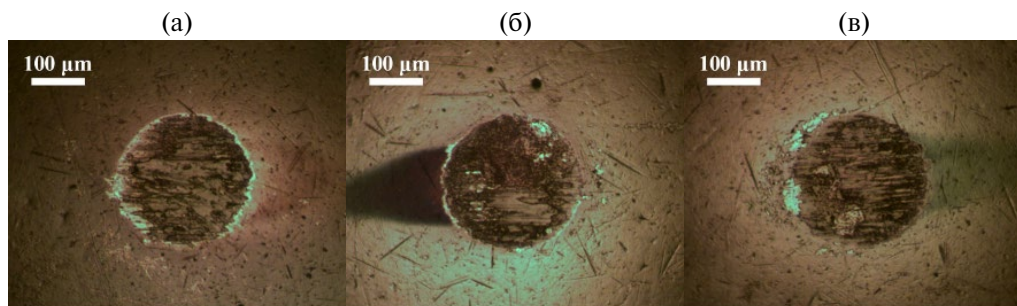


Рис. 6. Фотографии пятен износа после испытаний: (а) — масло Mobil Ultra SAE10W-40; (б) — то же масло + 2 мас. % фуллерена; (в) — то же масло + 1 мас. % УНТ.

путем введения в него наноуглеродных добавок. По-видимому, это объясняется тем, что масло Mobil Ultra SAE10W-40 — полноформульное, т. е. оно уже содержит высокоэффективный пакет присадок, обеспечивающий достаточно высокий уровень смазочной способности исследуемого масла, а в данном случае антифрикционные эффекты не суммируются. В то же время (рис. 2, 3) добавление тех же углеродных добавок в то же масло приводит к существенному снижению как коэффициента трения, так и температуры, генерируемой в контакте трущихся тел. Это связано с тем, что на машине КТ-2 был реализован граничный режим смазки, причем давления в трибологическом контакте на этой установке были существенно выше, чем на установке УМТ-1 (на КТ-2 был реализован точечный контакт образцов, а на УМТ — контакт по площади), скорости относительного движения существенно ниже, чем на УМТ (на КТ-2 — 0,24 мм/с, а на УМТ-1 — 1,5 м/с). Температура в контакте трущихся тел на КТ-2 задается от внешнего источника тепла, а при испытаниях на УМТ генерируется в зависимости от режима смазки, на который при геометрии контакта, реализованной на машине УМТ-1 при данных испытаниях, заметно влияют объемные характеристики масла, легированного указанными добавками. Достаточно увеличить нагрузку на узел трения с 80 до 200 Н, как коэффициент трения резко изменится (рис. 2, 3). Снижение температуры фрикционного разогрева при увеличении концентрации добавок не сказывается на результатах испытаний на установке КТ-2, поскольку температура образцов и окружающего их масла определяется задатчиком температуры. Анализируя результаты испытаний на машине КТ-2, следует иметь в виду, что они отражают условия трения только в режиме граничной смазки, когда контактирующие поверхности трущихся тел разделены только тончайшим слоем продукта взаимодействия активных компонентов смазочной среды с материалами поверхностных слоев контактирующих тел и изменение вязкости не оказывает влияния на результаты экспериментов.

**Выводы.** Таким образом, испытанные смазочные материалы с добавлением фуллеренов и углеродных нанотрубок показали схожий характер изменения коэффициента трения от температуры и повысили критическую температуру на 10–30 °С до наступления деструкции граничного слоя и резкого возрастания коэффициента трения. При этом необходимо учитывать, что эти результаты относятся только к условиям трения при граничной смазке, оптимизацию трибологических характеристик смазочных сред за счет изменения реологических свойств этих сред результаты испытаний на машине КТ-2 не отражают. Совместное рассмотрение результатов экспериментов рис. 2, 3, 5 позволяет объективно оценивать влияние на эффективность как поверхностных, так и объемных характеристик смазочных свойств масел на долговечность, энергоемкость и надежность смазываемых узлов трения современных машин и механизмов.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благоврадова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин Н. Н., Середа В. В. Энциклопедия химмотологии. М.: Перо, 2016. 960 с.
2. Евдокимов А. Ю., Фукс И. Г., Любинин И. А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект. К.: Атика-Н, 2012. 292 с.
3. Албагачиев А. Ю. и др. Серпентины как добавки к маслам: эффективность и механизм смазочного действия // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2021. № 5. С. 97.
4. Григорьев Ф. А., Ковалёва И. Н. Влияние углеродных и алюмосиликатных наполнителей на трибологические характеристики рапсового масла // В кн.: Сборник трудов XIII Меж-

дународной научно-технической конференции «ТРИБОЛОГИЯ — МАШИНОСТРОЕНИЕ». М.: ИМАШ РАН, 2020. С. 93.

5. *Duan L., Li J., Duan H.* Nanomaterials for lubricating oil application: A review // *Friction*. 2023. V. 11 (5). P. 647.
6. *Головин Ю. И.* Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
7. *Туктаров А. Р. и др.* Фуллеренсодержащие смазочные материалы: достижения и перспективы: Обзор // *Нефтехимия*. 2020. Т. 60. № 1. С. 125.
8. *Руденков А. С., Ярмоленко М. А.* Углеродные нанотрубки: классификация, особенности синтеза, методы исследования, области применения // *Проблемы физики, математики и техники*. 2019. № 2 (39). С. 7.
9. *Zhang Z. et al.* Effect of carbon nanotubes on friction and wear of a piston ring and cylinder liner systems under dry and lubrication conditions // *Friction*. 2017. V. 5 (2). P. 147.
10. *Буяновский И. А., Лаиши В. Л., Самусенко В. Д.* Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 2. С. 29.
11. *Комбалов В. С.* Методы и средства испытаний на трение и износ: справочник. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.