

Влияние введения одностенных углеродных нанотрубок на триботехнические характеристики минеральных и растительных масел

Ф.А. Григорьев^а, В.П. Селькин^б

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», ул. Кирова, 32а, Гомель, Беларусь

^а grigoriev.feodor@gmail.com, ^б selkin_v@mail.ru

^а <https://orcid.org/0003-0008-9042-4754>, ^б <https://orcid.org/0009-0008-6863-0339>

Статья поступила 25.08.25, принята 02.09.2025

Исследован вопрос о перспективах использования промышленно выпускаемых добавок с деагломерированными одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ) для повышения триботехнических характеристик (показателя износа, коэффициента трения, критической нагрузки, нагрузки сваривания) масел, предназначенных для смазывания узлов трения машин и механизмов промышленного оборудования. В качестве базового выбрано не содержащее специализированных присадок индустриальное масло И-40А. На примере масла рапсового технического проведена также оценка влияния добавок с ОУНТ на триботехнические характеристики растительных масел. Испытания на четырехшариковой машине трения показали, что использование добавок с ОУНТ в качестве присадок в индустриальные и растительные масла имеет перспективы в направлении улучшения их противоизносных свойств (обнаружено снижение показателя износа индустриального и растительного масел соответственно до 1,5 и 1,8 раз). Зафиксировано также незначительное уменьшение коэффициента трения при добавке ОУНТ в исследованные масла при смазывании ими пары скольжения сталь-сталь. При этом несущая способность масел существенно не изменяется. Обнаруженное повышение противоизносных свойств исследованных смазочных материалов может быть объяснено как взаимодействиями ОУНТ с поверхностью трения, так и, возможно, вследствие уменьшения фактической площади фрикционного контакта металл-металл при граничном трении. Отмечена также корреляция зависимости показателя износа масел и их удельного объемного электрического сопротивления от концентрации ОУНТ, что позволяет сделать предположение о влиянии повышения электрической проводимости масляной пленки на протекание трибоэлектрических процессов и изменение триботехнических характеристик исследованных смазочных материалов.

Ключевые слова: нанотрубки, одностенные углеродные нанотрубки, индустриальное масло, растительное масло, трибологические характеристики, противоизносные свойства, коэффициент трения.

The effect of introducing of single-walled carbon nanotubes on tribological characteristics of mineral and plant oils

F.A. Grigoriev^a, V.P. Selkin^b

Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus named after V.A. Beliy; 32a, Kirov St., Gomel, Belarus

^a grigoriev.feodor@gmail.com, ^b selkin_v@mail.ru

^a <https://orcid.org/0003-0008-9042-4754>, ^b <https://orcid.org/0009-0008-6863-0339>

Received 25.08.2025, accepted 02.09.2025

The issue of the prospects for using industrially produced additives with deagglomerated single-wall carbon nanotubes (SWCNT) to improve the tribological characteristics (wear index, friction coefficient, critical load, welding load) of oils intended for lubricating friction units of machines and mechanisms of industrial equipment is investigated. Industrial oil I-40A, which does not contain specialized additives, is chosen as the base oil. On the example of technical rapeseed oil, the effect of additives with SWCNT on the tribological characteristics of vegetable oils is also assessed. Tests on a four-ball friction machine show that the use of additives with SWCNT as additives in industrial and vegetable oils has prospects for improving their anti-wear properties (a decrease in the wear index of industrial and vegetable oils is up to 1.5 and 1.8 times, respectively). A slight decrease in the friction coefficient is also recorded when adding SWCNT to the studied oils during the process of lubricating steel-to-steel sliding pairs. The bearing capacity of the oils does not change significantly. The observed increase in the anti-wear properties of the studied lubricants can be explained both by the interactions of the SWCNT with the friction surface and, possibly, as a result of a decrease in the actual area of metal-to-metal frictional contact during boundary friction. The correlation of the dependencies of the wear index of oils and their specific volume electrical resistance on the concentration of SWCNT is also noted, which allows one to assume the influence of an increase in the electrical conductivity of the oil film on the course of triboelectric processes and changes in the tribological characteristics of the studied lubricants.

Keywords: nanotubes, single walled carbon nanotubes, industrial oils, vegetable oil, tribological characteristics, anti-wear properties, friction coefficient.

Введение. Долговременная и надежная работа машин и механизмов промышленного оборудования невозможна без использования смазочных материалов. Базовые минеральные или синтетические масла в своем чистом виде, в большинстве случаев, не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. В связи с этим, одним из важнейших рецептурно-технологических приемов улучшения функциональных характеристик смазочных материалов, является введение в их состав различных добавок – присадок и наполнителей [1]. В большинстве случаев присадки представляют растворимые в маслах продукты, а наполнители, как правило, представляют собой дисперсные системы, нерастворимые в базовых маслах. По функциональному назначению присадки и наполнители различают на антиокислительные, вязкостные, депрессорные, моющие, противоизносные, антифрикционные, противозадирные, адгезионные, антикоррозионные, антипенные и др. Стоит отметить, что функциональное деление добавок условное, так как многие из них влияют одновременно на несколько показателей. Помимо функциональной классификации добавок к смазочным материалам, на сегодняшний день их также можно подразделить на четыре основные группы: органические модификаторы трения, функциональные полимеры, маслорастворимые органические добавки и наноматериалы [2]. В последние годы возрос интерес к применению наноразмерных материалов в качестве функциональных добавок к смазочным материалам. Эффективность действия нанонаполнителей зависит от их морфологии, размера частиц, физических свойств, материалов сопрягаемых деталей, режима нагружения, состава смазочных материалов и других факторов.

Развитие методов синтеза наночастиц открыло дорогу к их использованию в широких масштабах [3]. Одними из наиболее перспективных наноматериалов являются углеродные нанотрубки. Совокупность их уникальных физических свойств позволила им найти применение при создании новых функциональных и конструкционных материалов [4]. Имеется два вида углеродных нанотрубок – одностенные (ОУНТ) и многостенные (МУНТ). ОУНТ представляют собой свернутую в цилиндр плоскость графена. Они были открыты еще в 1993 году [5]. По ряду свойства ОУНТ превосходят свои объемные аналоги – МУНТ [6, 7]. Однако из-за большей, по сравнению с многостенными нанотрубками, склонности к агломерации и практической невозможности достижения положительного эффекта, при введении в материалы без дополнительного воздействия ультразвука, их использование длительное время было ограничено. Проблема была решена организацией производства концентратов, содержащих предварительно деагломерированные ОУНТ. В качестве основы этих добавок, препятствующей сворачиванию ОУНТ с образованием клубков или глобул, используют пластификаторы и поверхностно-активные вещества. В настоящее время выпуск концентратов с деагломерированными ОУНТ достиг объема сотен тонн в год, что позволило снизить стоимость ОУНТ на несколько порядков и сделать их применение в промышленности экономически обоснованным. Благодаря способности ОУНТ создавать при введении в материа-

лы даже в незначительных количествах замкнутую электропроводящую сетку, они нашли использование, в первую очередь, при создании электропроводящих композитов и антистатических материалов на основе отверждаемых полимерных смол [8, 9]. Установлена возможность получения путем добавки ОУНТ электропроводящих материалов на основе термопластичных полимеров, включая фторсодержащие [10, 11]. При этом выпускается ряд концентратов, предназначенных для введения ОУНТ в жидкие и вязкотекучие материалы, что делает их перспективными для применения в качестве добавки в жидкие смазочные материалы. Причем, при исследовании влияния ОУНТ на трибологические характеристики пластичных смазок установлено, что при определенных режимах они позволяют снизить коэффициент трения и повысить противозадирные свойства в паре трения сталь-сталь [12]. Однако сведений об использовании добавок с деагломерированными ОУНТ в жидких смазочных материалах недостаточно. Настоящая работа направлена на частичное устранение этого пробела и оценку возможности повышения трибологических характеристик базовых промышленных масел путем использования выпускаемых на настоящий момент добавок, содержащих деагломерированные ОУНТ.

Кроме этого, учитывая все возрастающие требования по экологической безопасности, было проведено исследование влияния добавок с ОУНТ на триботехнические характеристики растительных масел, которые потенциально можно использовать как основу смазочных материалов для замены минеральных промышленных масел. В качестве базового объекта изучения, основываясь на результатах работы [13], было выбрано масло рапсовое техническое.

Цель работы. Установление влияния концентрации ОУНТ и состава основы добавок с деагломерированными ОУНТ на коэффициент трения, показатель износа, критическую нагрузку и нагрузку сваривания масел, предназначенных для смазывания узлов трения машин и механизмов промышленного оборудования. Кроме этого, учитывая влияние на механизмы смазки трибоэлектрофизических и трибоэлектрохимических процессов, установление возможной корреляции между зависимостями триботехнических и электрических характеристик масел от концентрации ОУНТ.

Методика исследования. Объектом исследования являлись не содержащие специализированных присадок масло промышленное марки И-40А по ГОСТ 20799-2022 и рапсовое масло марки Т (техническое) по СТБ 1486-2004. В качестве ОУНТ использовали нанотрубки Tuball (OCSiAl Group). Усредненная длина ОУНТ Tuball превышает 5 мкм, наружный диаметр $1,6 \pm 0,4$ нм, удельная площадь поверхности ≥ 300 м²/г [14]. Для введения ОУНТ в масло были использованы наиболее совместимые с исследуемыми маслами выпускаемые компанией OCSiAl добавки Matrix 204 и Matrix 205 (Matrix 204: деагломерированные ОУНТ – 10 масс. %, диметакриловый эфир триэтиленгликоля – 80 масс. %, алкиламмониевая соль – 10 масс. %; Matrix 205: деагломерированные ОУНТ – 10 масс. %, производные сложных эфиров жирных карбоновых кислот – 70 масс. %, алкиламмониевая соль – 20 масс. %). Вве-

дение добавок в масла осуществляли в течение 30 минут на лабораторном диссольтере при 2000 об/мин и периферийной скорости вращения фрезы 10 м/с.

Основные трибологические характеристики (показатель износа при 392 Н, критическую нагрузку и нагрузку сваривания) исходных и модифицированных ОУНТ масел оценивали по ГОСТ 9490-71 на четырехшариковой машине трения ЧШМ-К1 (ДП «Укртехмет»).

Коэффициент трения оценивали по величине силы трения скольжения пары сталь-сталь со смазанной исследуемым маслом поверхностью трения. В качестве схемы трения была выбрана схема «плоскость-плоскость», отвечающая условиям работы направляющих промышленного оборудования. Схема позволяет проводить испытания со смазкой опорной поверхности и применяется в ряде стандартов, например, ГОСТ 12.4.083-80 и ГОСТ ISO 21182-2016 (рис. 1), в которых в качестве привода и устройства для измерения силы трения служит разрывная машина.

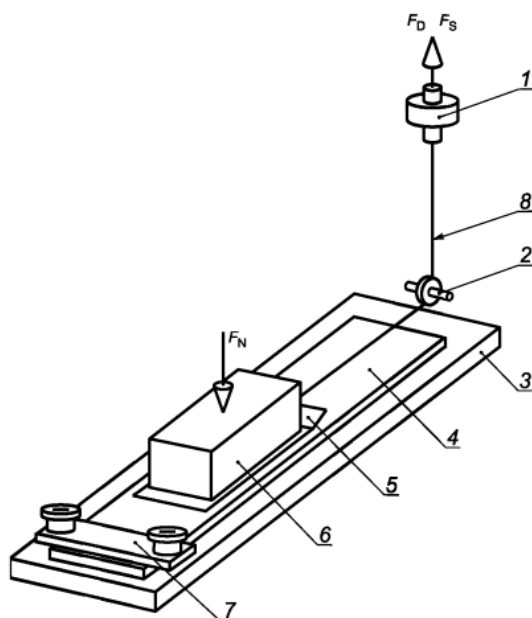


Рис. 1. Схема расположения аппаратуры для определения коэффициента трения: 1 – датчик силы разрывной машины; 2 – ролик для изменения направления приложения силы; 3 – испытательный стол; 4 – опорная поверхность; 5 – испытательная металлическая пластина; 6 – груз; 7 – зажим; 8 – тяговый тросик

В данной работе использовали испытательную машину Autograph AGS-1 kNX (Shimadzu Corporation), позволяющую поддерживать скорость движения траверсы с точностью $\pm 0,1\%$ и измерять силу с точностью в пределах $\pm 0,5\%$ от указанного усилия. Материал опорной поверхности и испытательной металлической пластины сталь Ст45 по ГОСТ 1050-2013. Груз для прикладывания нормальной силы – 50,0 Н. Шероховатость поверхностей трения – $R_a = 0,2$ мкм. Скорость скольжения – 0,01 м/с. Масло наносили на опорную поверхность тонким равномерным слоем без пропусков.

Удельное объемное электрическое сопротивление масел измеряли по ГОСТ 6581-75 с использованием

плоской измерительной ячейки трехзажимного типа и мегаомметра Е6-32 (АО НПФ «Радио-Сервис»).

Результаты исследований и их обсуждение. Обнаружено, что добавка ОУНТ позволяет снизить показатель износа масла И-40А до 1,5 раз и рапсового масла до 1,8 раз (рис. 2). Отмечено, что существенное уменьшение диаметра пятен износа при испытании на четырехшариковой машине отмечается уже при содержании в смазках 0,01 масс. % ОУНТ. После увеличения степени наполнения до 0,02 масс. % показатель износа стабилизируется или изменяется незначительно. Для оценки влияния на полученный результат основы концентратов, использованных при введении ОУНТ в масло, было проведено сравнение зависимостей 1 и 2 (рис. 2), соответствующих разным добавкам. Поскольку отличия между значениями кривых находятся в пределах погрешности эксперимента, можно сделать вывод, что основной вклад в снижение показателя износа вносят ОУНТ, а входящие в состав Matrix 204 и Matrix 205 дополнительные вещества ввиду их малой концентрации в масле влияют на противоизносные свойства не так значительно.

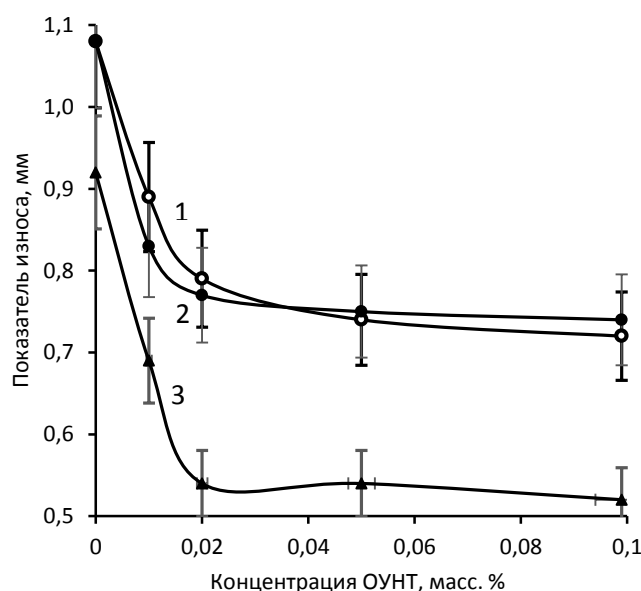


Рис. 2. Зависимость показателя износа по ГОСТ 9490 для масла И-40А (1, 2) и масла рапсового (3) от концентрации ОУНТ при введении ОУНТ с добавками Matrix-204 (1) и Matrix-205 (2, 3)

Существенного изменения несущей и предельной нагрузочной способности масел после добавки ОУНТ не обнаружено. Критическая нагрузка исследованных масел оставалась в пределах 490–519 Н. Увеличения нагрузки сваривания, которая для масла И-40А составляла 1166–1235 Н, также не отмечено.

Более значимые изменения, превышающие погрешность эксперимента, зафиксированы при измерении коэффициента трения скольжения пары сталь-сталь при введении ОУНТ, как в минеральное, так и в растительное масло (рис. 3). При наполнении 0,02 масс. % ОУНТ наблюдается уменьшение коэффициента примерно в 1,2 раза (с 0,15–0,17 до 0,11–0,13 при смазке

маслом И-40А и с 0,07–0,08 до 0,05–0,06 при смазке рапсовым маслом).

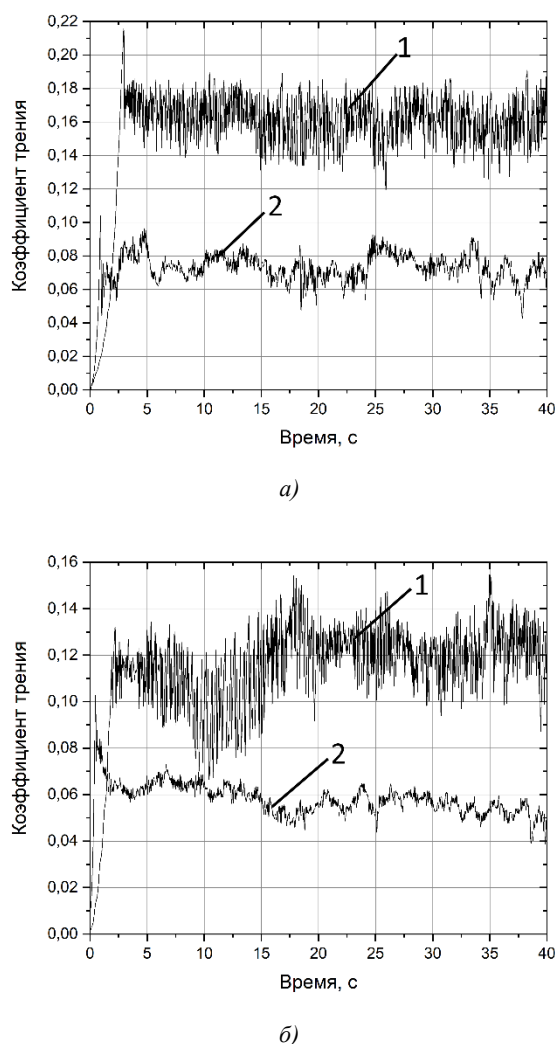


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения скольжения от пути трения в паре сталь-сталь при нагрузке 50 Н и смазке: а – маслом И-40А (1) и маслом рапсовым (2) без добавок; б – маслом И-40А (1) и маслом рапсовым (2) с 0,02 масс. % ОУНТ

В работе [17] при рассмотрении возможных механизмов повышения противоизносных свойств смазок с добавками на основе графена методами энергодисперсионной рентгеновской и сканирующей электронной микроскопии обнаружена повышенная концентрация углерода в следах износа на поверхности трения и осаждение графена, как в её впадинах, так и на гребнях. Автор данной работы в качестве основного механизма предложил уменьшение фактической площади фрикционного контакта металл-металл при граничном трении за счет формирования смазочной графеновой трибопленки.

Также обнаружено, что при введении ОУНТ удельное объемное электрическое сопротивление масел изменяется на 4–8 порядков (рис. 4). С увеличением концентрации ОУНТ электрическое сопротивление масел снижалось до значений, соответствующих электропроводящим материалам. При этом на зависимость изме-

нения электрического сопротивления масла И-40А оказывало влияние только концентрация ОУНТ независимо от используемой добавки: Matrix 204 или Matrix 205.

Объяснений обнаруженному улучшению трибологических характеристик масел при введении ОУНТ может быть несколько. Обладая очень большой удельной площадью графеновой поверхности ОУНТ, за счет дисперсионных сил и, возможно, химической адсорбции [15] могут закрепляться на активных центрах и дефектах поверхности трения, участвуя в формировании граничного слоя [16].

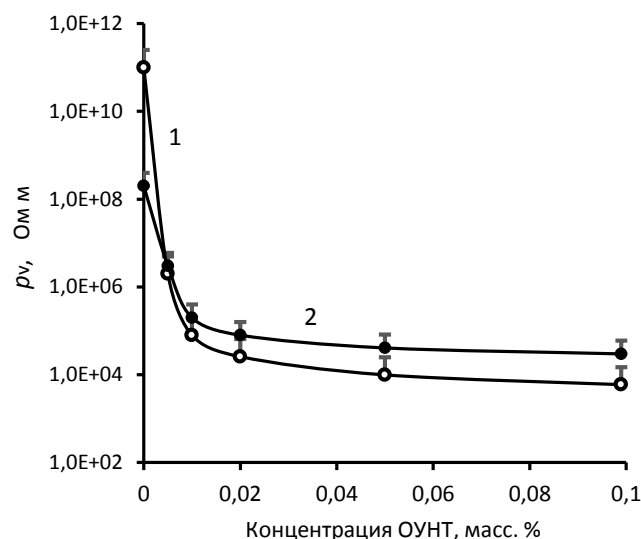


Рис. 4. Зависимость удельного объемного электрического сопротивления масла И-40А (1) и масла рапсового (2) от концентрации ОУНТ

На формирование граничного слоя и, как следствие, повышение противоизносных свойств смазки может оказывать влияние и образование в ней при добавке ОУНТ трехмерной электропроводящей сетки, о чем свидетельствует обнаруженное уменьшение удельного объемного электрического сопротивления масел, изначально являющихся диэлектриками, до значений менее $1 \cdot 10^5$ Ом·м при их наполнении более 0,01 масс. % ОУНТ (рис. 4).

Образование электропроводящей сетки и наблюдаемая при сравнении рис. 2 и 4 корреляция между зависимостями электрического сопротивления масел и их показателем износа от концентрации ОУНТ могут свидетельствовать о вкладе в полученный результат трибоэлектрических процессов. Известно, что при фрикционном контакте в паре трения происходит электризация и передача заряда между трущимися компонентами [18]. Причем электризация может достигать значительной величины. При использовании смазок, обладающих диэлектрическими свойствами, вследствие контактной разности потенциалов, может образовываться своеобразный конденсатор, способный накапливать трибоэлектрические заряды [19]. При этом известно, что изменение электропроводности масел может как стимулировать, так и подавлять протекание трибоэлектрохимических процессов в зоне контакта [20]. Учитывая вышеизложенное, полученный при добавке ОУНТ в исследованные масла результат можно также

объяснить влиянием на износ трущихся пар увеличением электрической проводимости формируемой ими граничной масляной пленки.

Следует отметить, что при рассмотрении возможно влияния ОУНТ на процессы трения существуют определенные трудности. Известные механизмы действия присадок к смазочным материалам [21] не всегда корректны применительно к нанодобавкам, поскольку существуют значительные различия в результатах, полученных при изучении трения на атомарном и макро уровнях [22]. Поэтому вопрос механизма влияния ОУНТ на противоизносные свойства исследованных в данной работе смазочных материалов требует дальнейшего изучения.

Заключение. Обнаружено, что использование ОУНТ в качестве присадки в минеральное (индустриальное марки И-40А) и растительное (рапсовое марки Т) масла позволяет улучшить их противоизносные свойства (снижение показателя износа при испытании на четырехшариковой машине до 1,8 раз) и уменьшить

(до 1,2 раз) коэффициент трения при смазывании пар скольжения сталь-сталь. При этом несущая способность масла существенно не изменяется. Обнаруженное снижение показателя износа и коэффициента трения можно объяснить, как адсорбционными взаимодействиями ОУНТ с поверхностью трения и уменьшением фактической площади фрикционного контакта металл-металл при граничном трении, так и созданием ими в объеме масла трехмерной электропроводящей сетки, оказывающей влияние на протекание трибоэлектрохимических и трибоэлектрофизических процессов.

Полученные результаты показывают возможность достижения положительного эффекта при использовании в маслах, предназначенных для смазывания узлов трения машин и механизмов промышленного оборудования, выпускаемых в настоящее время концентратов с деагломерированными ОУНТ и перспективность разработки подобных добавок с основой, максимально соответствующей смазочным материалам, в которых они будут использоваться.

Литература

- Mang T., Dresel W. Lubricants and Lubrication. 2 Volume Set. – Third, Completely Revised and Enlarged Ed. – Weinheim: Wiley-VCH, 2017. – 1203 p.
- H. Spikes. Friction Modifier Additives // Tribology Lett. – 2015. – V. 60, № 5. – P. 1–26.
- Bhushan B. (Ed.). Encyclopedia of Nanotechnology. – 2nd ed. – Dordrecht: Springer, 2016. – 4512 p.
- Раков Э.Г. Углеродные нанотрубки в новых материалах // Успехи химии. – 2013. – Т. 82, № 1. – С. 27–47.
- Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls / D.S. Bethune [et al.] // Nature. – 1993. – V. 363. – P. 605–607.
- Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Jorio A. Unusual properties and structure of carbon nanotubes // Annu. Rev. Mater. Res. – 2004. – V. 34. – P. 247–278.
- Kukovecz A., Konya Z., Kiricsi I. Single Wall Carbon Nanotubes // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. – 2004. – V. 9. – P. 923–946.
- Electrophysical characteristics of epoxy nanocomposites with ultralow percolation thresholds / Klyuev I.Y [et al.] // Inorganic materials: applied research. – 2020. – V. 11, № 2. – P. 416–419.
- Bryning M.B., Islam M.F. Very low conductivity threshold in bulk isotropic single walled carbon nanotube – epoxy composites // Advanced Materials. – 2005. – V. 17, № 9. – P. 1186–1191.
- Селькин В.П., Копылов С.В. Влияние ионизирующего излучения на электропроводность содержащего одностенные углеродные нанотрубки сополимера тетрафторэтилена с этиленом // Химия высоких энергий. – 2023. – Т. 57, № 5. – С. 419–420.
- Влияние введения одностенных углеродных нанотрубок на электрические и механические характеристики сополимера тетрафторэтилена с этиленом / Селькин В.П. [и др.] // Пластические массы. – 2023. – № 7–8. – С. 44–46.
- Трибологические свойства ряда пластичных смазочных материалов в композициях с углеродными наноструктурами различного строения / Парфенов А.С. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5 – С. 590–598.
- Ковалева И.Н., Григорьев Ф.А. Коррозионное воздействие и окисление растительных масел, используемых в смазочных материалах // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 6. – С. 684–688.
- Tuball. – URL: [https:// www.tuball.com](https://www.tuball.com) (дата обращения: 03.03.2025).
- Томилин О.Б., Мурюмин Е.Е. Адсорбция на графеновой поверхности углеродных нанотрубок и их энергетический спектр // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48, № 3, – С. 563–571.
- Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 193–242.
- Omrani Emad. Graphene-Based Lubrication for Tribological Applications: Nanolubricants and Self-lubricating Nanocomposites. – 2018. Dissertation. – URL: <http://digital.library.wisc.edu/1793/91772> (дата обращения: 03.03.2025).
- A combined experimental and theoretical study on the mechanisms behind tribocharging phenomenon and the influence of triboemission / Ciniero A. [et al.] // Tribology Online. – 2019. – V. 14, № 5. – P. 367–374.
- Рыжкин А.А., Бурлакова В.Э. Об электрических явлениях при трении // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, № 9. – С. 1564–1573.
- Spikes H.A. Triboelectrochemistry: Influence of Applied Electrical Potentials on Friction and Wear of Lubricated Contacts // Tribology Lett. – 2020. – V. 68, № 90. – P. 68–90.
- Dorinson A., Ludema K.C. Mechanics and Chemistry in Lubrication. – N.Y.: Elsevier, 1985. – P. 198–254.
- Hsu S., Ying C., Zhao F. The nature of friction: A critical assessment // Friction. – 2014. – V. 2, № 1. – P. 1–26.

References

- Mang T., Dresel W. Lubricants and Lubrication. 2 Volume Set. – Third, Completely Revised and Enlarged Ed. – Weinheim: Wiley-VCH, 2017. – 1203 p.
- H. Spikes. Friction Modifier Additives // Tribology Lett. – 2015. – V. 60, № 5. – P. 1–26.
- Bhushan B. (Ed.). Encyclopedia of Nanotechnology. – 2nd ed. – Dordrecht: Springer, 2016. – 4512 p.
- Rakov E.G. Carbon nanotubes in new materials // Russian Chemical Reviews. – 2013. – V. 82, № 1. – P. 27–47.
- Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls / D.S. Bethune [et al.] // Nature. – 1993. – V. 363. – P. 605–607.

6. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Jorio A. Unusual properties and structure of carbon nanotubes // *Annu. Rev. Mater. Res.* – 2004. – V. 34. – P. 247–278.
7. Kukovecz A., Konya Z., Kiricsi I. Single Wall Carbon Nanotubes // *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology.* – 2004. – V. 9. – P. 923–946.
8. Electrophysical characteristics of epoxy nanocomposites with ultralow percolation thresholds / Klyuev I.Y [et al.] // *Inorganic materials: applied research.* – 2020. – V. 11, № 2. – P. 416–419.
9. Bryning M.B., Islam M.F. Very low conductivity threshold in bulk isotropic single walled carbon nanotube – epoxy composites // *Advanced Materials.* – 2005. – V. 17, № 9. – P. 1186–1191.
10. Selkin V.P., Kopylov S.V. Effect of Ionizing Radiation on Electrical Conductivity of a Tetrafluoroethylene–Ethylene Copolymer Containing Single–Wall Carbon Nanotubes // *High Energy Chemistry.* – 2023. – V. 57, № 5. – P. 457–458.
11. The effect of the introduction of single–walled carbon nanotubes on the electrical and mechanical characteristics of the ethylene tetrafluoroethylene / Selkin V.P. [et al.] // *Plasticheskie massy.* – 2023. – № 7–8. – P. 44–46. (In Russian).
12. Berezina, E.V., Smirnova, A.I. et al. Tribological Properties of Plastic Lubricants in Compositions with Various Carbon Nanostructures / Parfenov A.S. [et al.] // *Journal of Friction and Wear.* – 2019. – V. 40, № 5. – P. 453–460.
13. Kavaliova I.N., Grigoriev F.A. Corrosive Action and Oxidation of Vegetable Oils Used in Lubricants // *Journal of Friction and Wear.* – 2018. – V. 39, № 6. – P. 535–538.
14. Tuball. – URL: [https:// www.tuball.com](https://www.tuball.com) (date of access: 20.02.2025).
15. Tomilin O.B., Muryumin E.E. Adsorption on the graphene surface of carbon nanotubes and their energy spectrum // *Physics of the Solid State.* – 2006. – V. 48, № 3. – P. 563–571. (In Russian).
16. Akhmatov A.S. *Molecular Physics of Boundary Friction.* – Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1966. – 480 c.
17. Omrani Emad. *Graphene–Based Lubrication for Tribological Applications: Nanolubricants and Self–lubricating Nanocomposites.* – 2018. Dissertation. – URL: <http://digital.library.wisc.edu/1793/91772> (date of access: 03.03.2025).
18. A combined experimental and theoretical study on the mechanisms behind tribocharging phenomenon and the influence of triboemission / Ciniero A. [et al.] // *Tribology Online.* – 2019. – V. 14, № 5. – P. 367–374.
19. Ryzhkin A.A., Burlakova V.E. On frictional electrical phenomena // *Vestnik Don State Technical University.* – 2011. – V. 11, № 9. – P. 1564–1573. (In Russian).
20. Spikes H.A. *Triboelectrochemistry: Influence of Applied Electrical Potentials on Friction and Wear of Lubricated Contacts* // *Tribology Lett.* – 2020. – V. 68, № 90. – P. 68–90.
21. Dorinson A., Ludema K.C. *Mechanics and Chemistry in Lubrication.* – N.Y.: Elsevier, 1985. – P. 198–254.
22. Hsu S., Ying C., Zhao F. The nature of friction: A critical assessment // *Friction.* – 2014. – V. 2, № 1. – P. 1–26.