

**ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ В УСЛОВИЯХ
АБРАЗИВНОГО ТРЕНИЯ**

Парфенов А.С., Сенатов Ю.А., Родинова П.А., Тувин А.А.

Парфенов Александр Сергеевич, Сенатов Юлий Александрович, Родинова Полина Алексеевна
Ивановская государственная медицинская академия,

г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 8.

E-mail: tugin@ivgpu.com

Тувин Александр Алексеевич

Ивановский государственный политехнический университет,

г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 21.

E-mail: tugin@ivgpu.com

Рассмотрена и экспериментально подтверждена возможность модификации растительных смазочных материалов углеродными наночастицами. Произведена оценка физикохимических свойств суспензий, состоящих из растительных масел и углеродных нанотрубок. Показано, что введение наноприсадки не приводит к значительному изменению кинематической вязкости и поверхностного натяжения. Седиментационная устойчивость оценена спектрофотометрическим методом, выявлено, что дисперсии углеродных нанотрубок обладают высокой стабильностью в растворах растительных смазочных материалов. Трибологические испытания проведены на машине трения МТУ-01 по схеме три шарика-плоскость. Доказано снижение абразивного износа, возникающего при загрязнении смазочного материала частицами корундами при использовании многостенных углеродных нанотрубок Таунит-М, которое может возникать за счет увеличения вероятности попадания наноприсадки в зону трения вместе с абразивными частицами.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, присадка, растительный смазочный материал, абразивный износ

APPLICATION OF LUBRICANTS OF PLANT ORIGIN MODIFIED WITH CARBON NANOPARTICLES UNDER ABRASIVE FRICTION

Parfenov A.S., Senatov Yu.A., Rodinova P.A., Tugin A.A.

Parfenov Alexander Sergeevich, Senatov Yuliy Aleksandrovich, Rodinova Polina Alekseevna

Ivanovo State Medical Academy,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 8.

E-mail: tugin@ivgpu.com

Tugin Aleksandr Alekseevich.

Ivanovo State Polytechnic University,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 21.

E-mail: tugin@ivgpu.com

The possibility of modifying vegetable lubricants by carbon nanoparticles is considered and experimentally confirmed. The evaluation of physical and chemical properties of suspensions consisting of vegetable oils and carbon nanotubes is produced. It is shown that the introduction of nano-additive does not lead to significant changes in kinematic viscosity and surface tension. Sedimentation stability has been evaluated by spectrophotometric method, it has been revealed that dispersions of carbon nanotubes have high stability in solutions of vegetable lubricants. Tribological tests were performed on MTU-01 friction machine using three-ball-plane scheme. Reduction of abrasive wear arising at contamination of the lubricant with corundum particles at use of multiwalled carbon nanotubes Taunit-M which can arise

due to increase of probability of nanosupplement penetration into a friction zone together with abrasive particles is proved.

Keywords: carbon nanotubes, additive, vegetable lubricant, abrasive wear

Введение

Экологическая безопасность смазочных материалов – одна из больших проблем трибологии. Применение в технике высокоэффективных синтетических смазок, может приводить к загрязнению почвы, водных ресурсов.

В последние годы Европейский союз проводит активную политику по снижению использования в сельском и лесном хозяйстве синтетических смазочных материалов, ограничивает применение нефтяных производных.

На первый план выходят экологически безопасные биоразлагаемые технические жидкости, получаемые из возобновляемого сырья.

Не меньшей проблемой является модификация смазочных материалов присадками различной природы: поверхностно-активными веществами, производными серы и хлора и др. Применение таких токсичных веществ, согласно современным экологическим представлениям, также должно быть ограничено.

Кроме того, утилизация и переработка подобных смазочных материалов также несет в себе высокие финансовые издержки.

В качестве альтернативы могут рассматриваться микро- и нанопорошки металлов, наноструктуры различной природы, в том числе углеродной [1-3].

Применение модифицированных присадками смазочных материалов преследует несколько задач, в зависимости от актуальности их применения в том или ином узле трения: снижение коэффициента трения; повышение предельной нагрузки функционирования смазочного слоя; снижение величины износа и достижение эффекта безысносности [4-6]. Одной из актуальных сегодня проблем является борьба с абразивным износом техники, узлы трения которой работают в неблагоприятных условиях высокой загрязненности и невозможности полной герметизации: сельскохозяйственная, строительная, горнодобывающая промышленности. Стоит отметить также текстильную технику, в узлах трения которой может скапливаться текстильная пыль, попадать абразивные частицы с обрабатываемого материала [7-9].

Материалы и методы

В качестве смазочных материалов (СМ) были выбраны масло виноградной косточки и широко используемое в трибологии касторовое масло (обладающей достаточно высокой температурой вспышки = 275 °С, нерастворимое в иных нефтепродуктах и не обладающее токсическим действием). Выбор смазочных материалов обусловлен различиями в жирнокислотном составе данных СМ [10] (табл. 1.).

Таблица 1

Процентное содержание жирных кислот в исследуемых смазочных материалах
Table 1. The percentage of fatty acids in the tested lubricants

	Касторовое масло	Масло виноградной косточки
Линолевая кислота	1–5%	72%
Олеиновая кислота	2–6%	16%
Пальмитиновая кислота	0,5–1%	7%
Стеариновая кислота	0,5–1%	4%
Рицинолевая кислота	85–95%	0,1–0,5%

В качестве присадки в масло вводились УНТ Таунит-М (производства ООО «НаноТех-Центр г. Тамбов»). Выбор углеродных нанотрубок обусловлен их высокой жесткостью, но при этом недостаточно высокой эффективностью при снижении износа в базовом масле [11-12]. Присадка углеродных наночастиц вводилась в смазочный материал (СМ) путем механического смешивания и последующего ультразвукового диспергирования. В качестве абразива был ис-

пользован электрокорунд 25А 0,063–0,125 (F180).

Экспериментальные данные и обсуждение

Было определено поверхностное натяжение жидкостей (при предварительном термостатировании в температурной ячейке в течение 15 минут). Эксперимент осуществлялся гравиметрическим методом. В качестве эталонной жидкости использовалась дистиллированная вода.

Таблица 2

Поверхностное натяжение СМ и их композиций с углеродными нанотрубками
Table 2. Surface tension of CM and their compositions with carbon nanotubes

Концентрация присадки, мас. %	Касторовое масло	Масло виноградной косточки
0	38,2±2,4 мН/м	34,2±1,9 мН/м
0,5	38,4±2,1 мН/м	34,7±2,0 мН/м
1,0	39,1±2,6 мН/м	34,8±2,0 мН/м
2,0	39,2±2,8 мН/м	35,0±2,1 мН/м

Испытания кинематической вязкости производились на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+ Pro. Скорость вращения шпинделя 100 RPM. Была произведена оценка кинематической вязкости суспензий касторового масла и масла виноградной косточки с нанотрубками (рис. 1). Испытания показали, что

введение углеродных нанотрубок не приводит к существенному изменению вязкости суспензий. Следует отметить, что зависимость вязкости суспензий от массовой концентрации углеродных нанотрубок хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью.

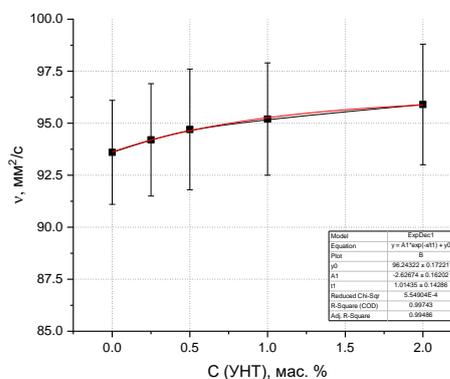
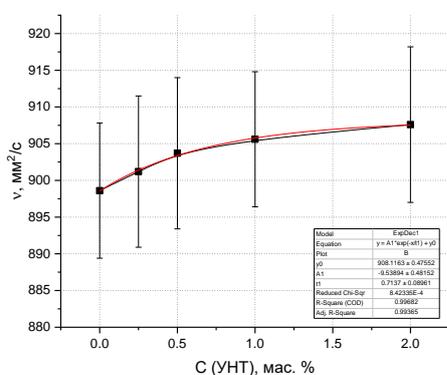
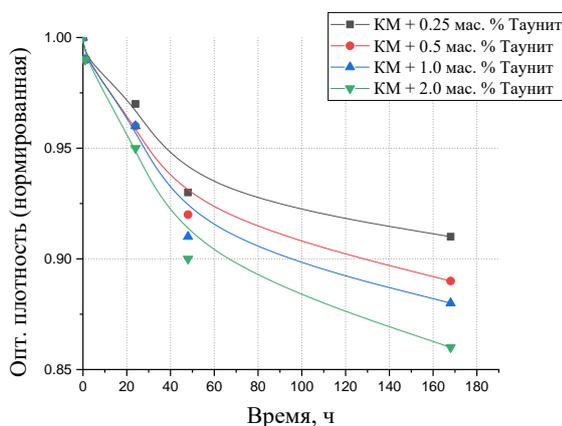
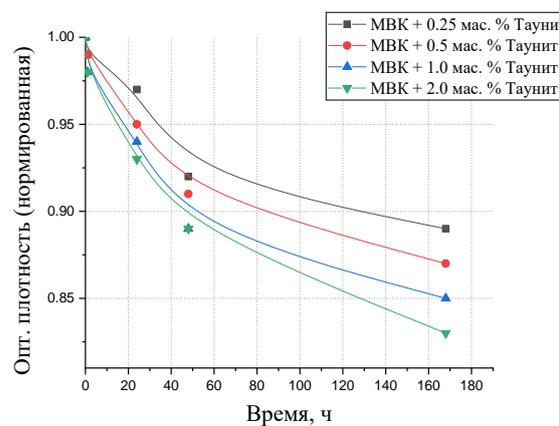


Рис. 1. Кинематическая вязкость суспензий касторового масла (а) и масла виноградной косточки (б) с углеродными нанотрубками

Fig. 1. Kinematic viscosity of suspensions of castor oil (a) and grape seed oil (b) with carbon nanotubes



а



б

Седиментационная устойчивость оценивалась спектрофотометрическим методом (длина волны поглощения 500 нм, испытания проводились в кварцевой кювете с оптической длиной пути 1мм).

Оценка седиментационной устойчивости суспензий (рис. 2) показала, что при условии предварительного ультразвукового диспергирования система смазочный материал – углеродные нанотрубки остается устойчивой в течение продолжительного промежутка времени.

Большое влияние на седиментационную устойчивость оказывает вязкость базового масла.

Трибологические испытания проводились на модернизированной универсальной машине трения МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004). Частота вращения шпинделя поддерживалась постоянной – 200 об/мин.

В качестве пары трения при испытаниях на изнашивании использовалась схема «три шарика-плоскость», материал шариков – сталь ШХ15, твердость 60-62 HRC, диаметр 12,7 мм;

стальная пластина изготовлена из стали Р6М5, диаметр 70 мм, шероховатость 1,25 Ra.

Оценка противоизносных свойств суспензий углеродные наноматериалы и систем, дополнительно загрязненных абразивным материалом. Абразивный материал вводился в массовой концентрации 0,5 мас. %.

Испытания показали, что добавление углеродных частиц в массовой концентрации 1% и 2% в касторовое масло не приводит к значительному снижению величины износа (максимальный эффект составляет 16%), что может быть связано с высокой вязкостью базового СМ, что препятствует транспорту углеродных наночастиц в зону трения. Загрязнение смазочного материала абразивными частицами приводит к резкому возрастанию площади пятна износа на величину до 73% (рис.1.). В случае использования углеродной присадки в присутствии частиц абразива, эффективность нанотрубок увеличивается с ростом их массовой концентрации, что приводит к снижению износа в таких суспензиях на величину до 27%.

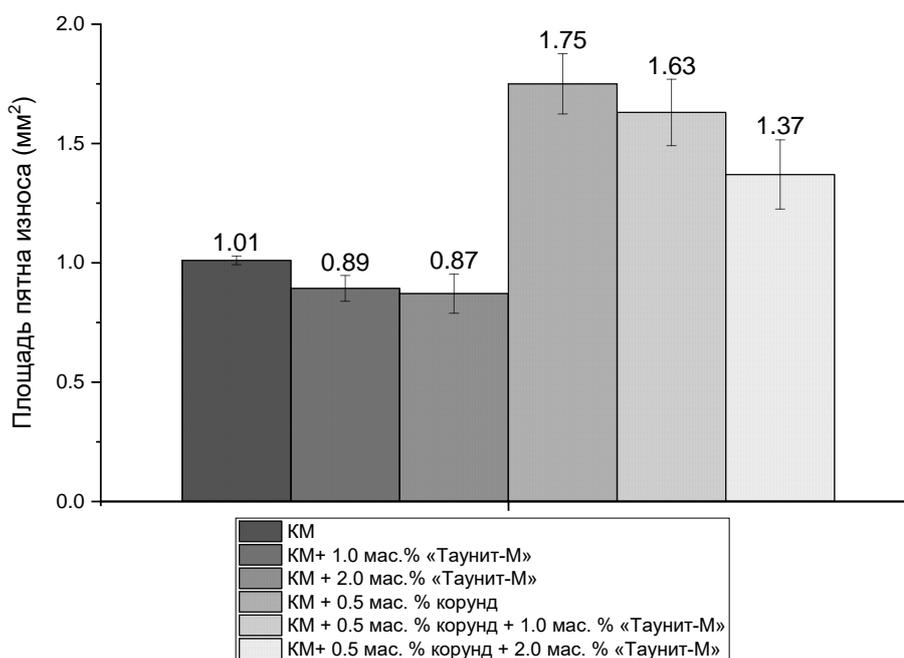


Рис.3. Величина износа в суспензиях касторового масла (КМ) с углеродными наночастицами (Таунит-М) и частицами абразива

Fig. 3. The magnitude of wear in suspensions of castor oil (CM) with carbon nanoparticles (Taunit-M) and abrasive particles

В случае суспензий с маслом виноградной косточки, наблюдается схожая ситуация (рис. 4), но следует отметить худшую трибологическую эффективность базового масла, кото-

рая связана как с иным содержанием жирных кислот, так и с меньшей вязкостью СМ, из-за чего может происходить разрушение масляной пленки при граничном трении. Введение угле-

родных нанотрубок в базовый СМ аналогично не приводит к значительному снижению величины износа (максимально на 10%). Введение абразивного загрязнителя увеличивает износ на величину порядка 69%, при этом углеродные нанотрубки в данной суспензии проявляют большую эффективность, снижая величину из-

носа до 41% в случае массовой концентрации 2%.

Отличия от касторового масла в данном случае можно связать с меньшей вязкостью у масла виноградной косточки, иным составом жирных кислот, который позволяет достичь оптимальной эффективности нанотрубок.

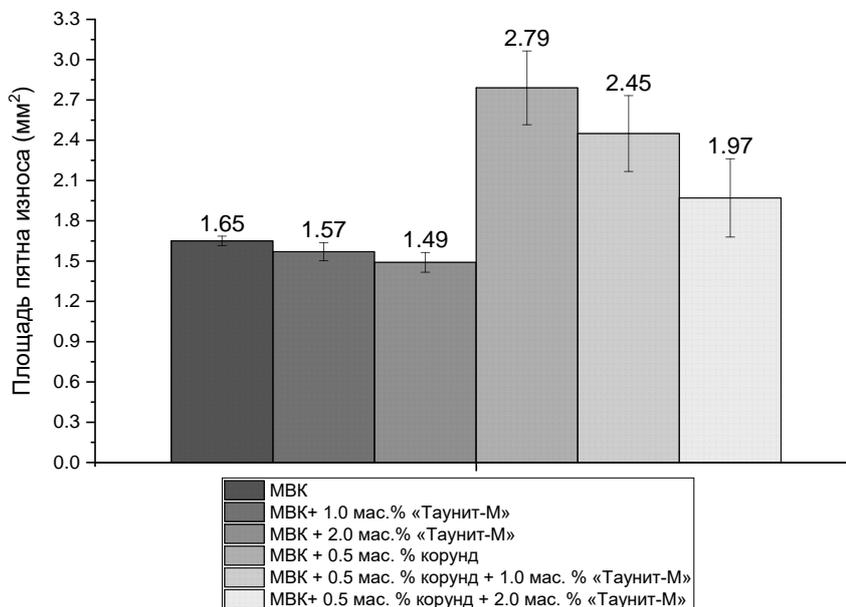


Рис.4. Величина износа в суспензиях масла виноградной косточки (МВК) с углеродными наночастицами (Таунит-М) и частицами абразива

Fig. 4. The magnitude of wear in suspensions of grape seed oil (MVA) with carbon nanoparticles (Taunit-M) and abrasive particles

Заключение

Введение углеродных структур в смазочные материалы растительного происхождения позволяет улучшить триботехнические характеристики смазочного материала за счет повышения его теплопроводности. Для активации углеродных наночастиц необходим дополнительный транспорт, в роли которого могут выступать абразивные частицы, как внесенные в смазочный материал извне (в случае использования в технике, работающей в условиях высокой запыленности), так и образовавшиеся в закрытых узлах трения, которые не оснащены системами тонкодисперсной очистки смазочного материала. В этом случае углеродные нанотрубки, связываясь с абразивными частицами, активнее переходят в зону контакта поверхностей, выступая в роли экранирующего фактора при «резании» частицами абразива материала деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhao J., Huang Y., He Y. et al.** Nanolubricant additives: A review. *Friction* 9, 891–917 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>
2. **Singh A., Chauhan P., & Mamatha T. G.** (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 25, 586–591. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.245>
3. **Gulzar M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Varman M., Zulkifli N. W. M., Mufti R. A., & Zahid R.** (2016). Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016 18:8, 18(8), 1–25. <https://doi.org/10.1007/S11051-016-3537-4>
4. **Sviridenok A.I. et al.** Tribological properties of lubricants modified by complexes of hard micro- and nanoparticles. *J. Frict. Wear*. 2012. Vol. 33, N 4. P. 266–273.
5. **Cursaru D.L. et al.** Study of the tribological behavior of different carbonaceous nanomaterials such as antiwear additives for an environmentally friendly lubricant. *Dig. J. Nanomater.*

6. **J. Zhu, J.M. Yoon, D. He, Y. Qu, and E. Bechhoefer.** “Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction with Particle Filtering,” *Int. J. Progn. Heal. Manag.*, vol. 4, N 3, Nov. 2020, doi: 10.36001/ijphm.2013.v4i3.2151.

7. **Худых М.И.** Эксплуатационная надежность и долговечность оборудования текстильных предприятий. М.: Легкая индустрия, 1980.

8. **Андреевков, Росляков, Гусейнов.** Экспериментальное исследование износа деталей трения швейных машин. *Дизайн и технологии.* 2009. № 13(55). С. 91–93.

9. **Bloch H.P., & Bannister K.E. (Eds.).** (2017). *Practical Lubrication for Industrial Facilities* (3rd ed.). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003151357>

10. **Melo-Espinosa E.A., Sánchez-Borroto Y., Errasti M., Piloto-Rodríguez R., Sierens R., Roger-Riba J., & Christopher-Hansen A.** (2014). Surface Tension Prediction of Vegetable Oils Using Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression. *B Energy Procedia* (V. 57, P. 886–895). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.298>

11. **Шилов М.А., Смирнова А.И., Столбов Д.Н., Усольцева Н.В.** Моделирование деформационных процессов углеродных нанотрубок. *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2020. Т. 20. № 1. С. 85–91. DOI 10.18083/LCAppl.2020.1.85.

12. **Попова М.Н. Жарова М.А., Усольцева Н.В., Смирнова А.И., Богданов В.С.** Реологические и триботехнические свойства индустриального масла с мезогенными присадками и углеродными нанотрубками. *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2014. Т. 14. № 1. С. 52–61.

REFERENCES

1. **Zhao J., Huang Y., He Y. et al.** Nanolubricant additives: A review. *Friction* 9, 891–917 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>

2. **Singh A., Chauhan P., & Mamatha T. G.** (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 25, 586–591. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.245>

3. **Gulzar M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Varman M., Zulkifli N. W. M., Mufti R. A., & Zahid**

R. (2016). Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research.* 2016 18:8, 18(8), 1–25. <https://doi.org/10.1007/S11051-016-3537-4>

4. **Sviridenok A.I. et al.** Tribological properties of lubricants modified by complexes of hard micro- and nanoparticles. *J. Frict. Wear.* 2012. Vol. 33, N 4. P. 266–273.

5. **Cursaru D.L. et al.** Study of the tribological behavior of different carbonaceous nanomaterials such as antiwear additives for an environmentally friendly lubricant. *Dig. J. Nanomater.*

6. **J. Zhu, J.M. Yoon, D. He, Y. Qu, and E. Bechhoefer,** “Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction with Particle Filtering,” *Int. J. Progn. Heal. Manag.*, vol. 4, N 3, Nov. 2020, doi: 10.36001/ijphm.2013.v4i3.2151.

7. **Худых М.И.** Эксплуатационная надежность и долговечность оборудования текстильных предприятий. М.: Легкая индустрия, 1980.

8. **Андреевков, Росляков, Гусейнов.** Experimental study of wear of friction parts of sewing machines. *Design and Technology.* 2009. N 13(55). P. 91–93.

9. **Bloch H.P., & Bannister K.E. (Eds.).** (2017). *Practical Lubrication for Industrial Facilities* (3rd ed.). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003151357>

10. **Melo-Espinosa E. A., Sánchez-Borroto Y., Errasti M., Piloto-Rodríguez R., Sierens R., Roger-Riba J., & Christopher-Hansen A.** (2014). Surface Tension Prediction of Vegetable Oils Using Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression. *B Energy Procedia* (V. 57, P. 886–895). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.298>

11. **Shilov M.A., Smirnova A.I., Stolbov D.N., Usol'tseva N.V.** Rolling wear of nanostructured elastomers for pneumatic tires. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2020. V. 20. N 1. P. 85–91. DOI 10.18083/LCAppl.2020.1.85.

12. **Popova M.N., Zharova M.A., Usol'tseva N.V., Smirnova A.I., Bogdanov V.S.** Rheological and tribological properties of industrial oil with mesogenic additives and carbon nanotubes. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2014. V. 14. N 1. P. 52–61.