

Научная статья

УДК 662.767.2+621.436

DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21)

СМАЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ БИОКЕРОСИНА

**Денис Александрович Уханов¹, Александр Петрович Уханов²,
Олег Станиславович Володько^{3✉}, Александр Павлович Быченин⁴**¹ 25-й государственный научно-исследовательский институт химмотологии Минобороны России, Москва, Россия.² Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия.^{3,4} Самарский государственный аграрный университет, Усть-Кинельский, Самарская область, Россия.¹ uханov_denis_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9507-893X>² dispgau@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2210-5294>³ volodko-75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8478-1358>⁴ bap63j@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8896-7547>

Резюме. Цель исследований – выполнить экспериментальную оценку смазочной способности рапсового и рыжикового биокеросина по результатам трибологических испытаний на четырехшариковом трибометре ТУ и аппарате HFRR. Мировым трендом в достижении углеродной нейтральности является снижение наземной транспортной техникой вредных выбросов, содержащихся в отработавших газах и образующихся в процессе сгорания углеводородных топлив в двигателях внутреннего сгорания, за счет более широкого применения альтернативных моторных топлив с малым «углеродным следом». Для Российской Федерации, с её огромными запасами углеводородного сырья, на современном этапе развития экономики целесообразен плавный энергопереход с традиционных видов углеводородного моторного топлива на альтернативные топлива. Перспективным альтернативным моторным топливом для транспортных дизелей является биокеросин, представляющий собой топливную композицию на основе авиационного керосина с добавлением в него растительного масла и цетаноповышающей присадки в определенном количестве. Поэтому возникает необходимость в экспериментальном определении не только показателей основных физико-химических и эксплуатационных свойств (плотность, вязкость, цетановое число, низшая теплота сгорания, фракционный состав, текучесть, экологичность и др.) биокеросина, но и его смазочной способности. Для этого выполнены сравнительные трибологические испытания опытных образцов трения на трибометре ТУ и аппарате HFRR по среднему пятну износа шариков в четырех смазочных средах: нефтяном летнем дизельном топливе, авиационном керосине и биокеросине, полученном добавлением в авиационный керосин рапсового и рыжикового масел.

Ключевые слова: трибологические испытания, керосин, рапсовое масло, рыжиковое масло, пятно износа, смазочная способность

Для цитирования: Уханов Д. А., Уханов А. П., Володько О. С., Быченин А. П. Смазочная способность биокеросина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. Т. 10, № 1. С. 17-21. DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21)

Original article

LUBRICABILITY OF BIO-KEROSENE

Denis A. Ukhanov¹, Alexander P. Ukhanov², Oleg S. Volodko^{3✉}, Alexander P. Bychenin⁴¹ 25-th State Scientific Research Institute of Chemical Pathology of the Russian Ministry of Defense, Moscow, Russia.² Penza State Agrarian University, Penza, Russia^{3,4} Samara State Agrarian University, Ust-Kinelsky, Samara region, Russia¹ uханov_denis_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9507-893X>² dispgau@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2210-5294>³ volodko-75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8478-1358>⁴ bap63j@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8896-7547>

Abstract. The purpose of the research – is to perform an experimental assessment of the lubricity of rapeseed and camelina biokerosene based on the results of tribological tests on a TU four-ball tribometer and an HFRR apparatus. The global trend in achieving carbon neutrality is the reduction of harmful emissions from land transport vehicles contained in exhaust gases and generated during the combustion of hydrocarbon fuels in internal combustion engines, through the wider use of alternative motor fuels with a small carbon footprint. For the Russian Federation, with its huge reserves of hydrocarbon raw materials, at the present stage of economic development, a smooth energy transition from traditional types of hydrocarbon-based motor fuel to alternative fuels is advisable. A promising alternative motor fuel for transport diesel engines is biokerosene, which is a fuel composition based on aviation kerosene with the addition of vegetable oil and a cetane-increasing additive in a certain amount. Therefore, there is a need to experimentally determine not only the indicators of the basic physicochemical and operational properties (density, viscosity, cetane number, lower

calorific value, fractional composition, fluidity, environmental friendliness, etc.) of biokerosene, but also its lubricity. For this purpose, comparative tribological tests of friction prototypes were carried out using a TU tribometer and an HFRR apparatus using the average wear spot of balls in four lubricating media: petroleum summer diesel fuel, aviation kerosene and biokerosene obtained by adding rapeseed and camelina oils to aviation kerosene.

Keywords: tribological tests, kerosene, rapeseed oil, camelina oil, wear scar, lubricity

For citation: Ukhanov, D. A., Ukhanov, A. P., Volodko, O. S. & Bychenin, A. P. (2025). Lubricability of bio-kerosene. *Izvestiia Samar-skoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 10, 1, 17-21 (in Russ.).

DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-17-21)

В глобальной проблеме уменьшения мировых парниковых газов в атмосфере Земли Российская Федерация для сохранения своего государственного суверенитета в области энергетической безопасности руководствуется своей климатической доктриной, заключающейся в снижении воздействия на климат без ущерба национальным интересам путем плавного перехода к достижению углеродной нейтральности [1, 2]. Это связано с тем, что в России имеются огромные запасы углеводородного сырья, пригодного для производства топлива для наземного, воздушного и морского транспорта, тепловых электростанций и котельных в течение многих десятилетий. При этом также принимается во внимание факт того, что сегодняшние объёмы вредных веществ и соединений (в основном углекислого газа CO_2), выбрасываемые производственными предприятиями и транспортом страны, практически полностью нейтрализуются её лесными и зелеными массивами. Поэтому для плавного энергоперехода России к углеродной нейтральности, запланированного к 2060 году, на современном этапе для транспорта России необходимо иметь такое альтернативное топливо, которое бы обладало физико-химическими и эксплуатационными свойствами не хуже традиционного нефтяного моторного топлива, но и превосходило его по экологическим и трибологическим показателям. Следует отметить, что в дизеле моторное топливо выполняет не только функции горючего вещества, но и смазки. Топливо, попадая в зазор прецизионных пар дизельной топливной аппаратуры, образует на поверхности сопрягаемых деталей («плунжер-втулка» топливного насоса высокого давления и «запорная игла-корпус распылителя» форсунок) смазочную пленку, которая снижает трение между сопрягаемыми деталями и их износ [3, 4, 11].

Для дизельной транспортной техники таким «заменителем» нефтяного моторного топлива в ближайшей перспективе может стать биокеросин, получаемый смешиванием авиационного керосина и растительного масла [5, 6, 7]. Наиболее известен биокеросин для самолетного турбореактивного двигателя [5], содержащий нефтяной и биологический компоненты: авиационный керосин и рыжиковое масло в равном процентном соотношении 50:50. Основным недостатком такого биокеросина при применении в качестве моторного топлива для транспортных дизелей является его пониженная воспламеняемость по причине низкого цетанового числа (40 ед.). Поэтому, для практического использования биокеросина в транспортных дизелях наземной техники разработан состав топливной композиции [6], включающий в качестве основы авиационный керосин ТС-1 в количестве до 96,7% масс., а в качестве добавки – рапсовое масло от 3% до 60% масс. и цетаноповышающую присадку этилгексилнитрат в количестве 0,3% масс.

В современных условиях для расширения ресурсной базы моторных топлив и перевода работы дизельной транспортной техники с традиционных видов нефтяного топлива на альтернативные возникает необходимость проведения экспериментальных исследований по оценке смазочной способности биокеросина с вышеуказанным компонентным составом [6].

Цель исследований – выполнить экспериментальную оценку смазочной способности биокеросина с различным компонентным и долевым составом по результатам трибологических испытаний на трибометре ТУ и аппарате HFRR.

Задачи исследований – определить смазочную способность рапсового и рыжикового биокеросина по пятну износа опытных образцов трения в сравнении между собой и с товарным нефтяным дизельным топливом.

Материал и методы исследований. Испытания опытных образцов трения проводились на универсальном трибометре ТУ [8] и аппарате HFRR в четырех смазочных средах: нефтяном летнем дизельном топливе марки ДТ-Л-К5, авиационном керосине ТС-1, рапсовом биокеросине и рыжиковом биокеросине в соответствии с ГОСТ ISO20623-2013 [9] и ГОСТ ISO12156-1-2012 [10]. Под рапсовым или рыжиковым биокеросином понимается топливная композиция, состоящая из авиационного керосина ТС-1 с добавлением в него рапсового или рыжикового масла и цетаноповышающей присадки в определенном количестве (по объему). Опытным образцом трения в трибометре ТУ является четырехшариковый узел, в обойме которого размещены три соприкасающихся между собой испытуемых стальных шарика, погруженные в смазочную среду, по поверхности которых скользит приводной металлический шарик, тогда как в аппарате HFRR – стальной шарик, совершающий возвратно-поступательное движение по поверхности неподвижной стальной пластины, погруженной в смазочную среду. Шарика трибометра

изготовлены из стали марки ШХ15 с твердостью по шкале Виккерса 179...207 и шкале Роквелла 63...67 с шероховатостью поверхности $R_a = 0,08$ мкм, шарик и пластина аппарата изготовлены из стали марки ISO 683-17-100Cr6 с твердостью шарика по шкале Роквелла 58...66 и пластины по шкале Виккерса 190...210 с шероховатостью её поверхности $R_a < 0,02$ мкм.

Испытания опытных образцов трения на трибометре ТУ проводились в течение 15 мин, под нагрузкой 450 ± 5 Н и частоте вращения вала привода 580 мин^{-1} ; на аппарате HFRR – в течение 75 мин, под нагрузкой 200 г, с амплитудой и частотой колебаний возвратно-поступательного движения шарика соответственно 1 мм и 50 Гц. Температура смазочной среды в обоих случаях составляла $60 \pm 2^\circ\text{C}$.

По окончании испытаний на трибометре или аппарате определялся средний диаметр пятна износа, образующийся на поверхности того или иного опытного образца трения и скорректированного к стандартному давлению водяных паров 1,4 кПа. Диаметр пятна износа на поверхности каждого из трех испытуемых шариков трибометра ТУ измеряли с помощью электронного микроскопа с точностью до тысячных миллиметра и затем определяли среднее значение диаметра пятна износа по результатам трех измерений. Диаметр пятна износа у испытуемого шарика аппарата HFRR измеряли с помощью микроскопа со стократным увеличением по двум осям координат (оси абсцисс и оси ординат) с точностью до 1 мкм и затем рассчитывали среднее значение диаметра пятна износа по результатам двух измерений.

Результаты исследований. Результаты выполненных трибологических испытаний нефтяного дизельного топлива, авиационного керосина, рапсового и рыжикового биокеросина представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты трибологических испытаний моторных топлив на универсальном трибометре ТУ

Вид и состав испытуемых топлив	Скорректированный диаметр пятна износа, мм
Дизельное топливо ДТ-Л-К5	0,305
Авиационный керосин ТС-1	0,489
Рапсовый биокеросин состава 90% ТС-1 + 10% рапсового масла	0,343
Рапсовый биокеросин состава 80% ТС-1 + 20% рапсового масла	0,307
Рапсовый биокеросин состава 70% ТС-1 + 30% рапсового масла	0,303
Рапсовый биокеросин состава 60% ТС-1 + 40% рапсового масла	0,298
Рапсовый биокеросин состава 50% ТС-1 + 50% рапсового масла	0,282
Рапсовый биокеросин состава 40% ТС-1 + 60% рапсового масла	0,290
Рапсовый биокеросин состава 30% ТС-1 + 70% рапсового масла	0,303
Рыжиковый биокеросин состава 90% ТС-1 + 10% рыжикового масла	0,254
Рыжиковый биокеросин состава 80% ТС-1 + 20% рыжикового масла	0,230
Рыжиковый биокеросин состава 70% ТС-1 + 30% рыжикового масла	0,273
Рыжиковый биокеросин состава 60% ТС-1 + 40% рыжикового масла	0,292
Рыжиковый биокеросин состава 50% ТС-1 + 50% рыжикового масла	0,309

Данные таблицы 1 показывают, что по результатам трибологических испытаний на трибометре ТУ содержание рапсового или рыжикового масла в авиационном керосине не должно превышать 20%...40% (по объему), так как при таком их процентном содержании в биокеросине средний диаметр пятна износа опытных образцов трения наименьший. Добавлять в авиационный керосин ТС-1 свыше 40% рапсового или рыжикового масла нецелесообразно по причине некоторого ухудшения смазочной способности биокеросина вследствие роста среднего скорректированного пятна износа на поверхности испытуемых шариков. Поэтому, в целях экономии трудовых затрат и финансовых средств трибологические испытания опытных образцов трения на аппарате HFRR проводились только в смазочной среде рапсового биокеросина с содержанием в авиационном керосине не более 50% рапсового масла (табл. 2).

Таблица 2

Результаты трибологических испытаний моторных топлив на аппарате HFRR

Вид и состав испытуемых топлив	Скорректированный диаметр пятна износа, мм
Дизельное топливо ДТ-Л-К5	0,403
Авиационный керосин ТС-1	0,748
Рапсовый биокеросин состава 90% ТС-1 + 10% рапсового масла	0,208
Рапсовый биокеросин состава 80% ТС-1 + 20% рапсового масла	0,188
Рапсовый биокеросин состава 70% ТС-1 + 30% рапсового масла	0,186
Рапсовый биокеросин состава 60% ТС-1 + 40% рапсового масла	0,211
Рапсовый биокеросин состава 50% ТС-1 + 50% рапсового масла	0,220

Анализ данных таблицы 2 показывает, что по результатам трибологических испытаний опытных образцов трения на аппарате HFRR происходит снижение среднего диаметра пятна износа шарика в смазочной среде дизельного топлива и авиационного керосина соответственно с 0,403 мм и 0,748 мм до 0,186 мм в смазочной среде рапсового биокеросина состава 70% ТС-1 + 30% рапсового масла, т.е. рапсовый биокеросин такого состава обладает наилучшей смазочной способностью из всех испытываемых составов. Последующее увеличение содержания рапсового масла в авиационном керосине с 30% до 50% приводит к увеличению среднего диаметра пятна износа до 0,220 мм.

Средний диаметр пятна износа у различных образцов рапсового биокеросина находится в пределах 0,186...0,220 мм, тогда как у керосина и дизельного топлива он равен соответственно 0,748 мм и 0,403 мм. В соответствии с ГОСТ 32511-2013 смазывающая способность моторного топлива для дизельных двигателей считается хорошей, если величина скорректированного диаметра пятна износа при температуре 60°C не превышает 0,460 мм. Таким образом, все испытываемые образцы рапсового и рыжикового биокеросина обладают относительно хорошими смазывающими свойствами, что в условиях реальной эксплуатации наземного транспорта на биокеросине будет способствовать снижению износа деталей прецизионных пар топливной аппаратуры дизеля.

Повышенная смазывающая способность биокеросина по сравнению с товарным нефтяным топливом и авиационным керосином обусловлена содержанием в рапсовом и рыжиковом маслах высших жирных кислот (ВЖК), обладающих свойствами ПАВ – поверхностно-активных веществ (табл. 3). Такие ВЖК образуют на поверхности сопрягаемых деталей адсорбционную пленку толщиной 0,05...0,1 мкм и более, уменьшающую трение в сопряжении и износ деталей.

Таблица 3

Высшие жирные кислоты растительных масел, обладающие свойствами поверхностно-активных веществ

Вид высшей жирной кислоты в растительном масле	Долевое содержание высшей жирной кислоты, %	
	рапсовое масло	рыжиковое масло
Олеиновая	59,56	12,77
Линолевая	20,423	24,28
Альфа-линоленовая	9,23	36,377
Эруковая	0,015	2,40
Итого высших жирных кислот	89,228	75,827

Примечание: в таблице 3 приведены сведения хроматографического анализа малоэрукового рапсового и рыжикового масел, полученных соответственно из семян сорта Ратник и Пензяк.

Несмотря на то, что процентное содержание ВЖК, обладающих свойствами ПАВ, в рапсовом биокеросине превышает содержание их в рыжиковом биокеросине, смазочная способность рыжикового биокеросина по величине среднего диаметра пятна износа опытных образцов трения несколько лучше, что объясняется по всей видимости лучшими антифрикционными свойствами адсорбционной пленки ПАВ, образующейся на поверхности опытных образцов трения в смазочной среде рыжикового биокеросина.

Заключение. По смазочной способности биокеросин превосходит нефтяное моторное топливо: авиационный керосин ТС-1 и дизельное топливо ДТ-Л-К5. Рациональным составом, обеспечивающим лучшую смазочную способность по наименьшему износу опытных образцов трения на трибометре ТУ и аппарате HFRR, является биокеросин с содержанием в авиационном керосине 20...40% рапсового или рыжикового масла.

Список источников

1. Новак А.В. Декарбонизация отраслей ТЭК: решение климатических задач без ущерба для энергобезопасности // Энергетическая политика. 2024. №7 (198). С.8-13.
2. Гайворонский А.И., Гордин М.В., Марков В.А. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике // Двигательное строительство. 2022. № 2 (288). С.4-28. DOI: 10.18698/jec.2022.2.4-28 EDN: WGWIU
3. Уханов Д.А., Уханов А.П., Ротанов Е.Г., Аверьянов А.С. Влияние дизельного смесового топлива на износ плунжерных пар ТНВД // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 3. С.105-108. EDN: OFZFJB
4. Уханов А.П., Уханов Д.А., Ротанов Е.Г. Снижение износа плунжерных пар ТНВД в результате применения рационального состава дизельного смесового топлива // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 2 (18). С.46-51. EDN: TZLCKR
5. Авиакомпания Люфтганза совершила первый полет на биотопливе // Интернет-ресурс ru.poezdka.de 174/2011-1299/Luftgansa-bio.
6. Патент № 2802026 РФ. МПК C10L 1/08, C10L 1/02, C10L 1/19. Топливная композиция для дизельных двигателей внутреннего сгорания / Д.А. Уханов, А.Д. Черепанова. Заявка №2022126888 от 17.10.2022, Опубл. 22.08.2023, Бюл. № 24.

7. Уханов Д.А., Черепанова А.Д., Уханов А.П. Исследование автомобильного дизеля при работе на биокеросине // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №1 (65). С.192-202. DOI: 10.18286/1816-4501-2024-1-192-202 EDN: DNGYPS
8. Ибатуллин И.Д. Трибологические испытания на фрикционную совместимость: монография. Самара : СНЦ РАН, 2014. 217 с.
9. ГОСТ ISO20623-2013. Нефть и нефтепродукты. Определение противозадирных и противоизносных свойств с использованием четырехшариковой машины (европейские условия). М. : Стандартинформ. 16 с.
10. ГОСТ ISO12156-1-2012. Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Часть 1. Метод испытаний. М. : Госстандарт. 8 с.
11. Володько О. С., Быченин А. П. Влияние реметализантов на процесс трения фрикционных дисков коробок передач // Самара АгроВектор. 2023, Т.3, № 4. С. 54-60. DOI: 10.55170/29493536_2023_3_4_54 EDN: EFJGJD.

References

1. Novak, A. V. (2024). Decarbonization of fuel and energy sectors: solving climate problems without compromising energy security // *Energy Policy*, 7 (198), 8-13. (in Russ.).
2. Gaivoronsky, A. I., Gordin, M. V., & Markov, V. A. (2022). Problems and prospects of using carbon-free and low-carbon motor fuels in various scenarios of transition to carbon-neutral energy. *Dvigatellestroenie*, (2), 4-28. (in Russ.).
3. Ukhanov, D. A., Ukhanov, A. P., Rotanov, E. G., & Averyanov, A. S. (2011). Effect of diesel mixed fuel on the wear of the plunger pairs of the injection pump. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii* (Bulletin Samara State Agricultural Academy), (3), 105-108. (in Russ.).
4. Ukhanov, A. P., Ukhanov, D. A. & Rotanov, E. G. (2015). Reducing wear of injection pump plunger pairs as a result of using a rational composition of mixed diesel fuel. *Technology of wheeled and tracked vehicles*. 2 (18). 46-51. (in Russ.).
5. Lufthansa Airlines made its first flight using biofuel. Internet resource ru.poezdka.de>174/2011-1299/Luftgansa-bio. (in Russ.).
6. Patent No. 2802026 RF. IPC C10L 1/08, C10L 1/02, C10L 1/19. Fuel composition for diesel internal combustion engines / D.A. Ukhanov, A.D. Cherepanova. – Application No. 2022126888 dated 10/17/2022, Publ. 08/22/2023, Bulletin. No. 24. (in Russ.).
7. Ukhanov, D. A., Cherepanova, A. D. & Ukhanov, A. P. (2024). Study of an automobile diesel engine when running on biokerosene. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 1 (65). 192-202. (in Russ.).
8. Ibatullin, I.D. (2014). Tribological tests for frictional compatibility. Samara. (in Russ.).
9. GOST ISO20623-2013. Oil and petroleum products. Determination of extreme pressure and anti-wear properties using a four-ball machine (European conditions). (in Russ.).
10. OST ISO12156-1-2012. Diesel fuel. Determination of lubricity using an HFRR apparatus. Part 1. Test method. (in Russ.).
11. Volodko, O. S. & Bychenin, A. P. (2023). The effect of remetalizants on the friction process of friction discs of gearboxes. *Samara AgroVektor (Samara AgroVector)*. 3, 4. 54-60. DOI: 10.55170/29493536_2023_3_4_54 EDN: EFJGJD. (in Russ.).

Информация об авторах:

Д. А. Уханов – доктор технических наук, профессор;
А. П. Уханов – доктор технических наук, профессор;
О. С. Володько – кандидат технических наук, доцент;
А. П. Быченин – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors:

D. A. Ukhanov – Doctor of Technical Sciences, Professor;
A. P. Ukhanov – Doctor of Technical Sciences, Professor;
O. S. Volodko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
A. P. Bychenin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 5.03.2025.
The article was submitted 20.01.2025; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 5.03.2025.