ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.436
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

Стендовые испытания на износ плунжерных пар на биодизельном топливе с различным содержанием рапсового и соевого масел

***И.И. Руденко*[1]✉, *А.С. Апатенко*[2], *О.А. Ступин*[3]**

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1] vanya.rudenko.82@mail.ru✉; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

[2] a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274

[3] stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

Аннотация. Ресурс плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД) зависит от качества дизельного топлива. Добавки растительных масел – например, рапсового и соевого, позволяют улучшить качество товарного дизельного топлива. В частности, полярные молекулы растительных масел, формируя пограничный смазочный слой, способны сдерживать изнашивание сопряжения «Плунжер-втулка». Целесообразно подобрать оптимальный состав биодизельного топлива, способного снизить скорость трибологического изнашивания и увеличить ресурс плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания. Для оценки эффективности использования биодизельного топлива определили износ плунжерных пар 4УТНМ топливного насоса высокого давления в среде биодизельного топлива при различных концентрациях рапсового и соевого масел. Сравнительные испытания на износ плунжерных пар 4УТНМ-1111410-01 провели на стенде КИ-1640. Исследование плунжерных пар ТНВД с контролем изменения их гидравлической плотности провели в среде чистого дизельного топлива и смесевого топлива, включающего в себя рапсовое или соевое масла в количестве 25, 50 и 75%. Установлено, что биодизельное топливо, содержащее 25 и 50% масла, в сравнении с товарным дизельным топливом позволяет сохранить работоспособность прецизионных сопряжений и увеличить ресурс плунжерных пар более чем на 1000 мото-часов (на 30%). Более высокая концентрация растительных добавок (75%) нецелесообразна, так как высокая плотность и вязкость смеси требуют дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива. В дальнейшем необходимо провести полевые эксплуатационные испытания автотракторной техники на биодизельном топливе, включающем в себя рапсовое или соевое масло в количестве 25 и 50%. Эксплуатация дизельных двигателей на биодизельном топливе будет способствовать снижению расходов, связанных с капитальным ремонтом топливной аппаратуры.

Ключевые слова: ресурс плунжерных пар; износ; износные испытания плунжерных пар; дизельное топливо; биодизельное топливо; рапсовое масло; соевое масло

Для цитирования: Руденко И.И., Апатенко А.С., Ступин О.А. Стендовые испытания на износ плунжерных пар на биодизельном топливе с различным содержанием рапсового и соевого масел // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 97-102. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

© Руденко И.И., Апатенко А.С., Ступин О.А., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Bench wear tests of plunger pairs using biodiesel fuel with various contents of rapeseed and soybean oils

I.I. Rudenko[1]✉***, A.S. Apatenko***[2]***, O.A. Stupin***[3]

[1, 2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[1] vanya.rudenko.82@mail.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

[2] a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274

[3] stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

Abstract. The service life of fuel injection pump (FIP) plunger pairs depends directly on the quality of diesel fuel. Adding vegetable oils, such as rapeseed and soybean oils, can enhance the performance of commercial diesel fuel. Specifically, the polar molecules present in vegetable oils form a boundary lubrication layer capable of mitigating wear at the plunger-bushing interface. Determining the optimal biodiesel composition is essential for reducing tribological wear rates and extending the service life of FIP plunger pairs without requiring structural modifications to existing fuel system components. To evaluate the effectiveness of biodiesel blends, wear tests were conducted on 4UTNM FIP plunger pairs exposed to varying concentrations of rapeseed and soybean oils. Comparative wear testing of 4UTNM-1111410-01 plunger pairs was performed using a KI-1640 test bench. The investigation involved monitoring changes in the hydraulic tightness of the plunger pairs across pure diesel fuel and blended fuels containing 25%, 50%, and 75% rapeseed or soybean oil. The findings indicate that biodiesel blends containing 25% and 50% vegetable oil maintain the operational integrity of precision-matched components and extend the service life of the plunger pairs by over 1,000 engine hours (approximately a 30% increase) compared to standard commercial diesel. Conversely, a higher concentration of vegetable oil additives (75%) is impractical due to the increased density and viscosity of the mixture, which would require additional costs to install supplementary fuel-heating systems. Further research will focus on conducting field operational tests of agricultural and automotive machinery using biodiesel fuel blends containing 25% and 50% rapeseed or soybean oil. Utilizing biodiesel in diesel engines will ultimately help reduce maintenance and overhaul expenses associated with fuel injection equipment.

Keywords: plunger pair service life; wear; plunger pair wear tests; diesel fuel; biodiesel fuel; rapeseed oil; soybean oil

For citation: Rudenko I.I., Apatenko A.S., Stupin O.A. Bench wear tests of plunger pairs using biodiesel fuel with various contents of rapeseed and soybean oils. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):97-102. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-97-102

Введение

Эксплуатация дизельных двигателей в АПК осложняется снижением качества дизельного топлива. С целью повышения качества дизельного топлива и удаления из него сернистых соединений проводят глубокую гидроочистку. Однако такое топливо отличается недостаточной смазывающей способностью деталей топливной аппаратуры, что является одной из причин уменьшения ресурса плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД) [1]. Помимо этого, плунжерные пары работают с микронным зазором (1…3 мкм) и в среде высокого давления выходят из строя в первую очередь [2-4].

Для увеличения ресурса плунжерных пар применяют биодизельное топливо [5], в котором в качестве биодобавок выступают неэтерифицированные растительные масла. Как отмечает P.S. Ranjit и др. [6], интенсивность изнашивания прецизионных пар топливных насосов зависит от продолжительности работы двигателя на биодизеле и концентрации растительных компонентов в смеси. Более того, D. Zhuravel [7] и D.N. Tziourtzioumis [8] доказали прямое влияние высококонцентрированных биодобавок на снижение надежности сопряжения «Плунжер-втулка» в связи с изменением кинематической вязкости горючего и ростом отложения нерастворимых осадков.

В России наиболее распространены рапсовое и соевое масла. Растительные масла хорошо смешиваются с товарным дизельным топливом [9].

Для обоснованного применения биодизельного топлива необходимо провести испытания на износ плунжерных пар топливного насоса высокого давления и оценить влияние добавок масла на их ресурс. Необходимо подобрать оптимальный состав биодизельного топлива, способного снизить скорость трибологического изнашивания и увеличить ресурс плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания [10, 11].

Цель исследований: определить интенсивность износа плунжерных пар ТНВД 4УТНМ в среде биодизельного топлива при различных концентрациях рапсового и соевого масел в сравнении с товарным дизельным топливом.

Материалы и методы

Износ плунжерных пар ТНВД определяли на стенде КИ-1640 (рис. 1). Исследовали плунжерные пары топливного насоса высокого давления 4УТНМ-1111410-01 из стали марки 25Х5М (рис. 2) одной партии и одинаковой гидравлической плотности, изготовленные на Ногинском заводе топливной аппаратуры (НЗТА).

Проведен полный цикл испытаний на износ плунжерной пары ТНВД 4УТНМ в среде товарного дизельного топлива и смесевого топлива, включающих в себя добавки как рапсового, так и соевого масла в количестве 25, 50 и 75% [12, 13]. Сначала на стенде КИ-1640 определяли гидравлическую плотность плунжерной пары в дизельном и смесевом топливах по стандартной методике (ГОСТ 10578-2020)[1]. Далее проводили износные испытания плунжерных пар в течение 4000 ч на стенде (рис. 1) в соответствии с разработанным способом[2]. Количество оборотов электродвигателя соответствовало 1000 об/мин. Значение гидравлической плотности плунжерной пары измеряли через каждые 500 ч. Полученные значения сравнивали с допускаемым руководством по эксплуатации[3] стенда КИ-1640 значением гидроплотности плунжерной пары 15 с.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний плунжерных пар ТНВД 4УТНМ на стенде КИ-1640 представлены в таблицах 1, 2. Динамика изменения гидроплотности плунжерных пар ТНВД при различном содержании рапсового и соевого масел в дизельном топливе и в чистом дизельном топливе отражена на рисунках 3, 4.

Согласно данным, представленным в таблицах 1 и 2, значение гидравлической плотности плунжерной пары увеличивается с ростом концентрации масла, что согласуется с данными зарубежных исследователей [6]. После испытаний в течение 4000 ч наибольший износ наблюдали на чистом дизельном топливе (20…30%). В частности, в чистом дизельном топливе значение гидравлической плотности составило 5 с, при добавлении 25% рапсового

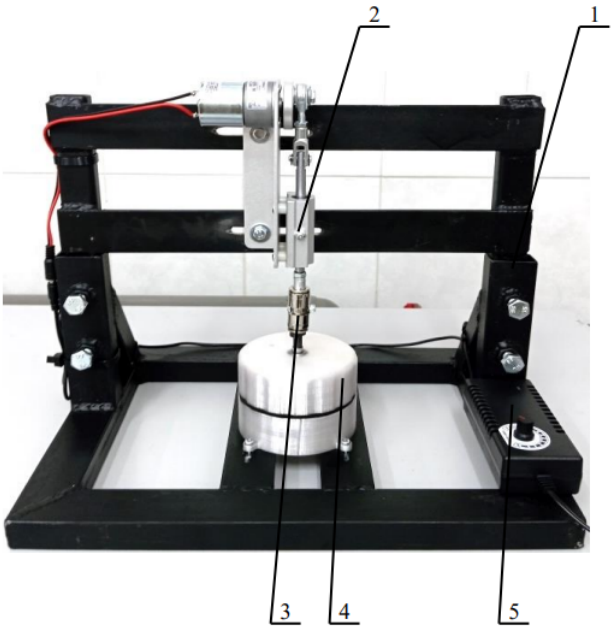


Рис. 1. Стенд для испытаний плунжерной пары на износ:
1 – рама; 2 – возвратно-поступательный механизм; 3 – переходник, соединяющий шток возвратно-поступательного механизма и поршень плунжерной пары; 4 – емкость для топлива; 5 – регулятор напряжения

Fig. 1. Test bench for plunger pair wear testing:
1 – frame; 2 – reciprocating mechanism; 3 – adapter connecting the reciprocating mechanism rod and the plunger pair piston; 4 – fuel tank; 5 – voltage regulator



Рис. 2. Плунжерная пара ТНВД 4УТНМ:
1 – поршень плунжерной пары; 2 – втулка плунжерной пары

Fig. 2. 4UTNM fuel injection pump plunger pair:
1 – plunger pair piston; 2 – plunger pair bushing

[1] ГОСТ 10578-2020. Насосы топливные дизелей. Технические требования и методы испытаний. https://files.stroyinf.ru/Index/74/74087.htm (дата обращения: 07.06.2026).

[2] Патент № 2866422 C1 Российская Федерация, МПК F02M 65/00. Способ испытаний плунжерной пары на износ: заявл. 28.12.2025: опубл. 20.07.2026 / И.И. Руденко, Д.А. Болясов. EDN: XODSSB.

[3] Проверка прецизионных элементов ТНВД. Общие сведения. URL.: https://studfile.net/preview/9968496/page:3/ (дата обращения: 07.06.2026).

Таблица 1

Гидроплотность плунжерной пары в зависимости от содержания рапсового масла (РМ)

Table 1

Hydraulic tightness of the plunger pair depending on the rapeseed oil (RO) content

Вид топлива	Время проведения испытаний плунжерной пары, ч								
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
	Гидравлическая плотность плунжерной пары, с								
ДТ	63	59	47	40	33	25	16	9	5
75% ДТ 25% РМ	69	65	57	45	38	33	25	21	17
50% ДТ 50% РМ	74	67	60	54	45	37	30	25	19
25% ДТ 75% РМ	81	77	66	56	48	38	32	26	20

Таблица 2

Гидроплотность плунжерной пары в зависимости от содержания соевого масла (СМ)

Table 2

Hydraulic tightness of the plunger pair depending on the soybean oil (SO) content

Вид топлива	Время проведения испытаний плунжерной пары, ч								
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
	Гидравлическая плотность плунжерной пары, с								
ДТ	63	59	47	40	33	25	16	9	5
75% ДТ 25% СМ	66	65	54	44	36	28	24	19	17
50% ДТ 50% СМ	71	69	57	47	39	31	27	24	19
25% ДТ 75% СМ	84	71	64	52	45	34	32	26	22

масла – 17 с, при 50% РМ – 19 с, при 75% РМ – 20 с (рис. 3). Результаты испытаний плунжерных пар ТНВД с добавлением соевого масла представлены на рисунке 4.

Отметим, что расхождения в значениях гидравлической плотности плунжерных пар в определенный период испытаний у двух масел незначительны. Так, после 400 ч испытаний гидравлическая плотность плунжерных пар при содержании соевого масла в биодизельном топливе в количестве 25% составила 17 с, при 50% СМ – 19 с, при 75% СМ – 22 с. Отметим также, что по сравнению с чистым дизельным топливом добавление рапсового и соевого масла в количестве 25 и 50% увеличивает ресурс плунжерных пар ТНВД с 3000 до 4000 мото-часов (на 20…30%). Однако использование рапсового масла в количестве 75% биодобавки является нецелесообразным ввиду повышения плотности и вязкости смеси, что требует

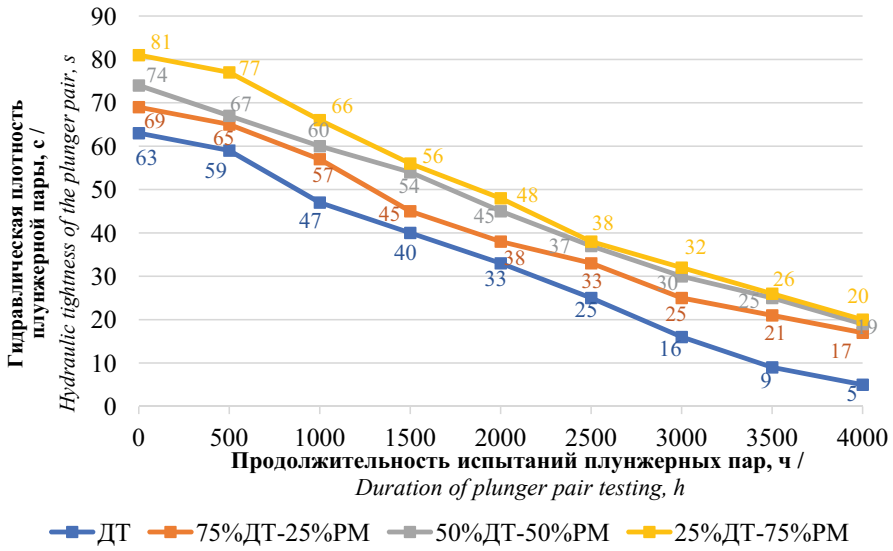


Рис. 3. Гидравлическая плотность плунжерной пары в зависимости от концентрации рапсового масла

Fig. 3. Hydraulic tightness of the plunger pair depending on rapeseed oil concentration

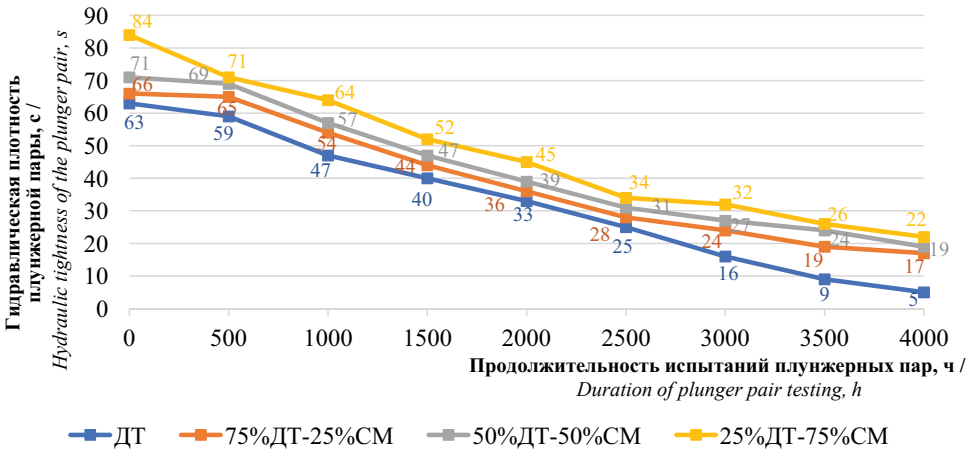


Рис. 4. Гидравлическая плотность плунжерной пары в зависимости от концентрации соевого масла

Fig. 4. Hydraulic tightness of the plunger pair depending on soybean oil concentration

дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива. Полученные наблюдения согласуются с результатами исследований [7, 8].

Результаты стендовых исследований подтверждают увеличение ресурса плунжерных пар ТНВД при оптимальных концентрациях рапсового и соевого масел в количестве 25 и 50%.

Для верификации оптимального состава биодизельного топлива и увеличения ресурса плунжерных пар ТНВД без конструктивной модернизации элементов системы питания в дальнейшем целесообразно провести полевые эксплуатационные испытания автотракторной техники на биодизельном топливе с включением 25 и 50% рапсового или соевого масел.

Выводы

Интенсивность изнашивания деталей плунжерных пар ТНВД 4УТНМ снижается при использовании биодизельного топлива. После 4000 ч стендовых испытаний гидравлическая плотность плунжерных пар ТНВД на биодизельном топливе в сравнении с товарным дизельным топливом увеличивается на 20…30%.

Применение рапсового и соевого масел в количестве 25 и 50% сохраняет работоспособность прецизионных сопряжений и увеличивает ресурс плунжерных пар более чем на 1000 мото-часов, что позволяет продлить период эксплуатации топливной аппаратуры на 30% без ее конструктивной модернизации.

Применение растительных добавок в количестве 75% является нецелесообразным, так как высокие плотность и вязкость высококонцентрированной смеси требуют дополнительных затрат на установку систем подогрева топлива.

Список источников

1. Уханов А.П., Володько О.С., Ротанов Е.Г. Сравнительные ускоренные испытания ТНВД на износ плунжерных пар при работе на нефтяном и бионефтяном топливах // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. Т. 9, № 2. С. 28-33. EDN: IERPCF

2. Уханов А.П., Уханов Д.А., Ротанов Е.Г. и др. Испытание секций ТНВД на различных видах топлива // Сельский механизатор. 2018. № 9. С. 34-35. EDN: HVEXJW

3. Уколова Н.В., Новикова Н.А. Направления государственной поддержки развития рынка биотоплива в России // Аграрный научный журнал. 2015. № 6. С. 97-100. EDN: TXGHMH

4. Голубев И.Г., Руденко И.И. Испытание дизелей на топливе с биодобавками // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 114, № 1. С. 66-68. EDN: RYHUZV

5. Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Mironov A.V., Stupin O.A. Information bank of parametric data for controlling the resource loading of elements of technical systems of technological machines. Steel in Translation. 2023;53(3):238-242. https://doi.org/10.3103/s0967091223030026

6. Ranjit P.S., Ahmed Z., Bhurat S.S. et al. Comprehensive comparative study of the durability wear

References

1. Ukhanov A.P., Volodko O.S., Rotanov E.G. Comparative accelerated wear testing of fuel injectors plunger pairs in operation with oil and bio-oil fuels. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2024;9(2):28-33. (In Russ.)

2. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Rotanov E.G., et al. Testing of fuel pump sections on various types of fuel. *Selskiy mekhanizator*. 2018;9:34-35. (In Russ.)

3. Ukolova N.V., Novikova N.A. Directions of the state support for the biofuel market development in Russia. *The Agrarian Scientific Journal*. 2015;6:97-100. (In Russ.)

4. Golubev I.G., Rudenko I.I. Testing diesel engines on fuel with bioadditives. *Trudy GOSNITI*. 2014;114(1):66-68. (In Russ.)

5. Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Mironov A.V., Stupin O.A. Information bank of parametric data for controlling the resource loading of elements of technical systems of technological machines. *Steel in Translation*. 2023;53(3):238-242. https://doi.org/10.3103/s0967091223030026

6. Ranjit P.S., Ahmed Z., Bhurat S.S. et al. Comprehensive comparative study of the durability wear assessment of a diesel engine fuelled with Jatropha seed oil and diesel fuel and its troubleshooting

assessment of a diesel engine fuelled with Jatropha seed oil and diesel fuel and its troubleshooting and scheduled maintenance. ACS Omega. 2024;9(43):43331-43352. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00204

7. Zhuravel D., Samoichuk K., Petrychenko S. et al. Modeling of diesel engine fuel systems reliability when operating on biofuels. Energies. 2022;15(5):1795. https://doi.org/10.3390/en15051795

8. Tziourtzioumis D.N., Stamatelos A.M. Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of biodiesel. Energies. 2019;12(10):1953. https://doi.org/10.3390/en12101953

9. Апатенко А.С., Руденко И.И., Севрюгина Н.С. Сопоставление согласованности характеристик типовых фильтрующих элементов с работой в биотопливе из рапсового масла // Естественные и технические науки. 2022. № 1 (164). С. 223-229. EDN: AGZHZS

10. Глазков Ю.Е., Глазкова М.М. Анализ особенностей эксплуатации двигателей транспортных средств на различных видах биотоплива // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-2. С. 27-30. EDN: RVFUIU

11. Нагорнов С.А., Марков В.А., Мещерякова Ю.В. и др. Исследование топливоподачи дизеля, работающего на биотопливе // Автомобильная промышленность. 2023. № 4. С. 7-11. EDN: YXZYAM

12. Марков В.А., Девянин С.Н., Слепцов О.Н. и др. Физико-химические и моторные свойства смесевых биотоплив с добавками растительных масел // Транспорт на альтернативном топливе. 2023. № 6 (96). С. 54-70. EDN: CGSZSJ

13. Шамарин Ю.А., Руденко И.И., Титов В.А. Организация рационального использования моторного топлива на АТП // Аграрный научный журнал. 2023. № 11. С. 205-211. EDN: QPRVPY

Информация об авторах

[1] **Руденко Иван Иванович,** канд. техн. наук, старший преподаватель; rudenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171; SPIN-код: 2469-1792

[2] **Апатенко Алексей Сергеевич,** д-р техн. наук, профессор; a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274; SPIN-код: 7553-2715

[3] **Ступин Олег Александрович,** старший преподаватель; stupin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X; SPIN-код 8620-2870

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

И.И. Руденко – методолония, проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование

А.С. Апатенко – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование

О.А. Ступин – ресурсы, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 09.06.2026, после рецензирования и доработки 16.10.2026, принята к публикации 19.10.2026

and scheduled maintenance. *ACS Omega*. 2024;9(43):43331-43352. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00204

7. Zhuravel D., Samoichuk K., Petrychenko S. et al. Modeling of diesel engine fuel systems reliability when operating on biofuels. *Energies*. 2022;15(5):1795. https://doi.org/10.3390/en15051795

8. Tziourtzioumis D.N., Stamatelos A.M. Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of biodiesel. *Energies*. 2019;12(10):1953. https://doi.org/10.3390/en12101953

9. Apatenko A.S., Rudenko I.I., Sevryugina N.S. Comparison of the consistency of the characteristics of typical filter elements with work in biofuels from rapeseed oil. *Natural and Technical Sciences*. 2022;1:223-229. (In Russ.)

10. Glazkov Yu.E., Glazkova M.M. Analysis of the operational features of vehicle engines using various types of biofuels. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020;67-2:27-30. (In Russ.)

11. Nagornov S.A., Markov V.A., Meshcheryakova Yu.V. et al. Investigation of diesel engine fuel supply, powered by biodiesel fuel. *Avtomobilnaya promyshlennost.* 2023;4:7-11. (In Russ.)

12. Markov V.A., Devyanin S.N., Sleptsov O.N. et al. Physico-chemical and motor properties of mixed biofuels with vegetable oil additives. *Alternative Fuel Transport.* 2023;6(96):54-70. (In Russ.)

13. Shamarin Yu.A., Rudenko I.I., Titov V.A. Organization of rational use of motor fuel at the ATP. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;11:205-211. (In Russ.)

Author Information

Ivan I. Rudenko[1], CSc (Eng), Senior Lecturer; rudenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0009-0008-4769-7171

Aleksei S. Apatenko[2], DSc (Eng), Professor; a.apatenko@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-2492-9274; Scopus Author ID: 57216908465

Oleg A. Stupin[3], Senior Lecturer; stupin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0002-1466-572X

[1, 2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

I.I. Rudenko – methodology, investigation, writing – original draft, review and editing of the manuscript;

A.S. Apatenko – research supervision, writing – review and editing of the manuscript;

O.A. Stupin – resources, visualization.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication.

Received 09.06.2026; Revised 16.10.2026; Accepted 19.10.2026