

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-492244>

Оригинальное исследование



Идентификация максимального давления цикла безмоторным методом на основе удельной рефракции

С.А. Плотников¹, П.В. Гневашев¹, М.В. Смольников¹, Г.П. Шишкин²¹ Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация;² Кировский государственный медицинский университет, Киров, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Российские учёные постоянно занимаются вопросами оценки работы двигателя нестандартными методами, как их принято называть «экспресс-методами». Во многих случаях, если исходные компоненты сохраняют относительное постоянство своих физико-химических свойств, определение показателей работы может быть проведено достаточно простыми классическими методами рефрактометрии, магнитооптики, денсиметрии, межфазной тензиометрии или их сочетанием (комплексированием).

Цель работы — является идентификация максимального давления цикла при работе дизеля безмоторным методом на основе значений удельной рефракции для каждого вида биотоплива.

Материалы и методы. Объектом исследований явился четырёхтактный двигатель с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха Д-245.5S2. Для исследования были подготовлены смеси ДТ с этанолом, рапсовым и сурепным маслом. Массовая доля масел и этанола в смеси варьировалась от 0% до 50%. Для каждого образца измерялась плотность d и показатель преломления n_D^{20} . Измерения проводились при температуре окружающей среды 20°C. Показатель преломления образцов измерялся с помощью рефрактометра ИРФ-4546. Плотность определялась с помощью пикнометра ПЖ-2-25 и лабораторных весов VIBRAAJH-620CE по ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Результаты. Анализ данных показал, что имеет место сильная корреляционная связь между удельной рефракцией sR и максимальным давлением в цилиндре P_z (МПа). Были разработаны модели линейной регрессии для различных составов альтернативных топлив, позволяющие определять максимальное давление цикла при работе дизеля.

Заключение. Применение предложенных зависимостей позволяет с достаточной точностью идентифицировать максимальное давление цикла при работе дизеля безмоторным способом.

Ключевые слова: дизель; альтернативное топливо; безмоторный метод; максимальное давление цикла; удельная рефракция.

Как цитировать:

Плотников С.А., Гневашев П.В., Смольников М.В., Шишкин Г.П. Идентификация максимального давления цикла безмоторным методом на основе удельной рефракции // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. 331–337. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-492244>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-492244>

Original study article

Identification of maximal cyclic pressure with the non-motorized method based on specific refraction

Sergey A. Plotnikov¹, Pavel V. Gnevashev¹, Mikhail V. Smolnikov¹, Gennady P. Shishkin²

¹ Vyatka State University, Kirov, Russian Federation;

² Kirov State Medical University, Kirov, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Russian scientists constantly deal with the issues of the engine performance evaluation with non-standard methods, as they are commonly called “express methods”. In many cases, if the initial components retain the relative constancy of their physicochemical properties, the determination of performance indicators can be carried out with simple classical methods of refractometry, magneto-optics, densimetry, interfacial tensiometry or their combination (aggregation).

AIM: Identification of the maximal cycle pressure of an operating diesel engine with the non-motorized method based on the values of specific refraction for each type of biofuel.

METHODS: The object of research was the D-245.5S2 turbocharged four-stroke engine with intercooler. Mixtures of DT with ethanol, rapeseed oil and surep oil were prepared for the study. The mass fraction of oils and ethanol in the mixture varied from 0% to 50%. Density d and refractive index n_D^{20} were measured for each sample. The measurements were carried out at an ambient temperature of 20 °C. The refractive index of the samples was measured using the IRF – 454b refractometer. The density was determined using the PZh-2-25 pycnometer and the VIBRAAJH-620CE laboratory scales according to GOST 3900-85 “Oil and petroleum products. Methods for determining density”.

RESULTS: Data analysis showed that there is a strong correlation between the specific refraction sR and the maximal pressure in a cylinder P_z (MPa). Linear regression models for various alternative fuel mixtures have been developed to determine the maximal cycle pressure during diesel operation.

CONCLUSION: The application of the proposed dependencies makes it possible to identify the maximal cycle pressure of an operating a diesel engine with sufficient accuracy in a non-motorized way.

Keywords: diesel; alternative fuel; non-motorized method; maximal cycle pressure; specific refraction.

To cite this article:

Plotnikov SA, Gnevashev PV, Smolnikov MV, Shishkin GP. Identification of maximal cyclic pressure with the non-motorized method based on specific refraction. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(4):331–337. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-492244>

Received: 07.06.2023

Accepted: 15.09.2023

Published online: 21.11.2023

ВВЕДЕНИЕ

Контроль и управление процессами нефтепереработки и нефтехимии тесно связаны с решением целого ряда аналитических задач. Во многих случаях не требуется детальной информации об индивидуальных химических компонентах сырья или продукции, а достаточными оказываются сведения лишь о групповом углеводородном составе исследуемых нефтепродуктов. Основные групповые компоненты светлых нефтепродуктов представлены ароматическими углеводородами, алканами, нафтенами и непредельными соединениями. Известные и зарекомендовавшие себя физические и химико-аналитические методы определения группового состава не являются экспрессными, что оставляет широкое поле для поиска новых физических принципов, на которых могли бы основываться системы автоматического регулирования и контроля нефтехимических процессов [1]. Метод магнитного двулучепреломления является хорошей основой для разработки эффективных экспресс-анализаторов нефтепродуктов, позволяющих через корреляционные соотношения прогнозировать целый комплекс эксплуатационных и потребительских свойств топлив, включающий октановые числа и содержание ароматических углеводородов в бензинах, максимальную высоту не коптящего пламени керосинов и реактивных топлив, нагарный фактор, фактор дымности, люминометрическое число, низшую теплоту сгорания и коэффициент теплопроводности, цетановые числа дизельных топлив и содержание в них полициклических ароматических соединений. Вопросы контроля протекания любых технологических процессов (органический и нефтехимический синтез, процессы компаундирования топлив, разработка и производство композиционных составов (растворителей), используемых в процессах нефтедобычи и нефтеподготовки, производство средств бытовой химии и т.д.) также связаны с необходимостью контроля изменения и определения состава или концентраций исходных и образующихся в реакционной смеси веществ, с необходимостью определения соответствия состава смеси, получаемой простым смешиванием компонентов, установленным нормативам. В настоящее время арсенал физических методов определения состава смесей исчисляется десятками, если не сотнями. Во многих случаях, если исходные компоненты сохраняют относительное постоянство своих физико-химических свойств, определение состава смеси может быть проведено достаточно простыми классическими методами рефрактометрии, магнитооптики, денсиметрии, межфазной тензиометрии или их сочетанием (комплексированием). Российские учёные постоянно занимаются вопросами оценки работы двигателя нестандартными методами, как их принято называть «экспресс-методами» [2, 3].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель работы — идентификация максимального давления цикла при работе дизеля безмоторным методом на основе значений удельной рефракции для каждого вида биотоплива.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- определить максимальное давление цикла при работе дизеля на различных составах биотоплива при добавке этанола, рапсового и сурепного масел;
- рассчитать удельную рефракцию для различных составов биотоплива при добавке этанола, рапсового и сурепного масел;
- вывести зависимости между максимальным давлением цикла и удельной рефракцией.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований является четырёхтактный двигатель с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха Д-245.5S2, используемый на различных энергоустановках. В эксплуатационных условиях двигателя внутреннего сгорания, в зависимости от условий работы потребителя энергии, должны работать при различных частотах вращения коленчатого вала (КВ) и крутящих моментах, т.е. на различных режимах по той или иной характеристике. На данном этапе исследовались параметры рабочего процесса дизеля при помощи процесса индицирования при работе на биотопливе, в частности, на этаноле-топливной эмульсии (ЭТЭ). Для получения данных рабочего процесса путем индицирования использовались датчик динамического давления PS-01 с пьезокварцевым чувствительным элементом и датчик индуктивного типа — отметчик положения поршня в цилиндре двигателя в положении ВМТ. Датчик PS-01 устанавливался в камеру сгорания с применением дополнительной системы охлаждения. В экспериментальном исследовании использовался нагрузочный электротормозной стенд RAPIDO SAK N670 с балансирной маятниковой машиной.

Для исследования были подготовлены смеси ДТ с этанолом, рапсовым и сурепным маслом. Массовая доля масел и этанола в смеси варьировалась от 0% до 50%. Для каждого образца измерялась плотность ρ

и показатель преломления n_D^{20} . Измерения проводились

при температуре окружающей среды 20°C. Показатель преломления образцов измерялся с помощью рефрактометра ИРФ-4546. Плотность определялась с помощью пикнометра ПЖ-2-25 и лабораторных весов VIBRAAJH-620CE по ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены совмещённые индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на чистом ДТ и ЭТЭ с содержанием 20% и 40% этанола в смеси. Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества этанола в эмульсии ведёт к росту угла φ_i , соответствующего периоду задержки воспламенения, момент воспламенения сдвигается в сторону ВМТ [4]. Так, при частоте вращения 1800 мин^{-1} и работе на чистом ДТ, угол, соответствующий моменту отрыва линии нарастания давления, равен $\varphi_d = 20,5^\circ$ до ВМТ, а при содержании этанола в эмульсии 20% и 40% он равен, соответственно, $\varphi_{\text{ЭТЭ}} = 17,3^\circ$ и $\varphi_{\text{ЭТЭ}} = 16,9^\circ$ до ВМТ.

Как видно из графика максимальные давления цикла P_z для ЭТЭ с содержанием этанола 20% и 40%, соответственно, равны 10,816 МПа и 11,137 МПа. Значения P_z для остальных составов топлив при проведении индицирования представлены в таблице 1.

Следующим этапом предстояло выяснить удельную рефракцию, но перед этим нужно было измерить плотность каждого состава [5, 6]. Расчёт производился по формуле:

$$d = \frac{m_{\text{пс}} - m_{\text{пн}}}{m_{\text{нд}} - m_{\text{пн}}} \cdot 0,99703, \quad (1)$$

где $m_{\text{пс}}$ — масса пикнометра со смесью; $m_{\text{пн}}$ — масса пустого пикнометра; $m_{\text{нд}}$ — масса пикнометра с дистиллированной водой; 0,99703 — значение относительной плотности воды при 20°C с учетом плотности воздуха.

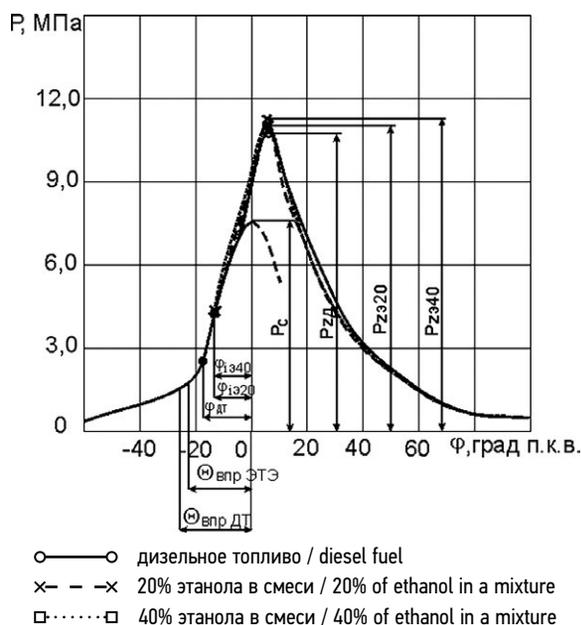


Рис. 1. Индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$.

Fig. 1. The 4CHN 11.0/12.5 diesel engine indicator diagram at $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$.

Так как показатель преломления и плотность зависят от температуры и давления, при которых проводится измерение, то для экспресс-методов оценки эксплуатационных свойств предпочтительно использовать не сами эти величины, а их функцию — удельную рефракцию Лорентца-Лоренца sR , которая практически не зависит от внешних условий: температуры окружающей среды и давления [7].

$$sR = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{d}. \quad (2)$$

В ходе проведения анализа научной литературы [8, 9] было выявлено, что связь удельной рефракции и максимального давления цикла нигде чётко не описана. Существенным отличием предлагаемого способа от всех, ранее известных решений, является возможность идентификации показателей процесса сгорания топлива при работе дизеля, а именно максимального давления цикла P_z через значение удельной рефракции sR состава топлива (табл. 1).

Анализ исходных данных (табл. 1 и рис. 2) показал, что имеет место сильная корреляционная связь между удельной рефракцией sR и максимальным давлением в цилиндре P_z (МПа). Отсутствие теоретической модели, которая позволила бы установить функциональный вид зависимости давления от показателя преломления, вынуждает пользоваться моделью линейной регрессии:

1. Для состава альтернативного топлива с добавлением сурепного масла зависимость примет вид:

$$P_z = 10.628 - 0.01425C,$$

где C — концентрация (%) сурепного масла в составе топлива.

2. Для состава альтернативного топлива с добавлением рапсового масла зависимость примет вид:

$$P_z = 10.613 - 0.01464C,$$

где C — концентрация (%) рапсового масла в составе топлива.

3. Для состава альтернативного топлива с добавлением этанола зависимость примет вид:

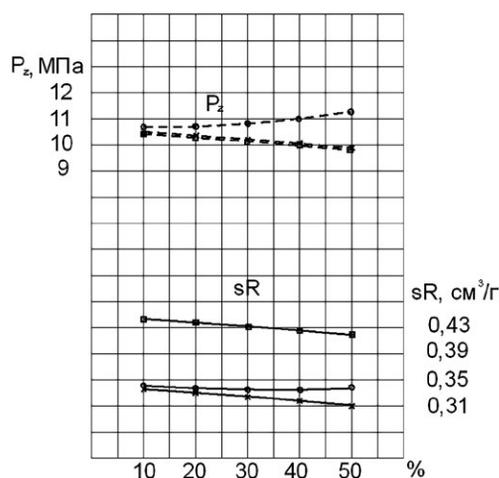
$$P_z = -1.507 \cdot 10^{-4}C + 0.0237C + 10.413;$$

где C — концентрация (%) этанола в составе топлива.

Известно, что удельная и молярная рефракции не зависят от внешних условий: температуры, давления, агрегатного состояния вещества. Однако, они находятся в зависимости от состава топлива, наличия органических веществ, содержащих углерод и водород, то есть от природы происхождения топлива и числа атомов в молекуле [10]. Органическая часть жидких топлив состоит

Таблица 1. Значения максимального давления цикла P_z и значения удельной рефракции sR составов топлива**Table 1.** Values of the maximum cycle pressure P_z and values of specific refraction sR of fuel mixtures

№ п/п	Состав топлива	Удельная рефракция sR (этанол) при $t=20^\circ\text{C}$, $\text{см}^3/\text{г}$	Значение P_z , МПа	Удельная рефракция sR (рапсовое масло) при $t=20^\circ\text{C}$, $\text{см}^3/\text{г}$	Значение P_z , МПа	Удельная рефракция sR (сурепное масло) при $t=20^\circ\text{C}$, $\text{см}^3/\text{г}$	Значение P_z , МПа
1	90%ДТ+10%ЭТ	0,3323	10,641				
2	90%ДТ+10%РМ			0,3299	10,433		
3	90%ДТ+10% Сурепное					0,4359	10,453
4	80%ДТ+20%ЭТ	0,3321	10,816				
5	80%ДТ+20%РМ			0,3270	10,366		
6	80%ДТ+20% Сурепное					0,4315	10,390
7	70%ДТ+30%ЭТ	0,3319	10,984				
8	70%ДТ+30%РМ			0,3240	10,178		
9	70%ДТ+30% Сурепное					0,4297	10,201
10	60%ДТ+40%ЭТ	0,3334	11,137				
11	60%ДТ+40%РМ			0,3212	10,020		
12	60%ДТ+40% Сурепное					0,4263	10,041
13	50%ДТ+50%ЭТ	0,3329	11,214				
14	50%ДТ+50%РМ			0,3188	9,874		
15	50%ДТ+50% Сурепное					0,4227	9,915



значения sR / values of sR

○ — ○ для смеси с этанолом / for the mixture with ethanol

× — × для смеси с рапсовым маслом / for the mixture with rapeseed oil

□ — □ для смеси с сурепным маслом / for the mixture with surep oil

значения P_z / values of P_z

○ — ○ для смеси с этанолом / for the mixture with ethanol

× — × для смеси с рапсовым маслом / for the mixture with rapeseed oil

□ — □ для смеси с сурепным маслом / for the mixture with surep oil

Рис. 2. Графические зависимости удельной рефракции и максимального давления цикла на составах топлив с различным содержанием этанола, рапсового и сурепного масел.

Fig. 2. Graphs of specific refraction and maximal cyclic pressure in dependence on content of ethanol, rapeseed oil and sunflower oil in fuel mixtures.

из большого количества сложных химических соединений, образованных пятью химическими элементами: углерод (С), водород (Н), сера (S), кислород (О) и азот (N). Теплота, выделяющаяся вследствие термохимического окисления топлива, идет на повышение внутренней энергии рабочего тела и на совершение механической работы. А это, в свою очередь, влияет на скорость окисления топлива и тепловыделения а, значит, величину максимального давления газов в цилиндре, что позволяет использовать значение sR при нахождении P_z . Влияние свойств топлива на процесс сгорания в цилиндре дизеля следует рассматривать в связи с зависимостью характеристик топлива. Применение в дизеле топлив облегченного фракционного состава ведет к увеличению периода задержки воспламенения и скорости тепловыделения в фазе быстрого сгорания. При этом возрастают максимальное давление цикла и скорость его нарастания [11].

Применение предложенных зависимостей позволяет с достаточной точностью идентифицировать максимальное давление цикла при работе дизеля безмоторным способом.

Технико-экономическое обоснование предлагаемого способа заключается в возможности идентификации значения максимального давления цикла при работе дизельных двигателей на различных составах альтернативного топлива безмоторным способом, что, в свою очередь, приводит к снижению затрат на испытания.

ВЫВОДЫ

1. Идентификация максимального давления цикла при работе дизеля на различных составах топлива вполне возможна посредством значения удельной рефракции этого же топлива.
2. Максимальное давление цикла при работе дизеля на ЭТЭ с содержанием этанола в смеси от 10% до 50% соответственно равно 10,641 МПа, 10,816 МПа, 10,984 МПа, 11,137 МПа и 11,214 МПа.
3. Расчёт удельной рефракции показал, что для состава топлива 80%ДТ+20%РМ значение равно $sR = 0,3270 \text{ см}^3/\text{г}$, а для состава с сурепным маслом до 50% будет равно $sR = 0,4227 \text{ см}^3/\text{г}$.
4. Дальнейшей задачей исследований может являться выявление зависимости удельной рефракции с показателями выбросов токсичных компонентов в отработавших газах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. С.А. Плотников — общее руководство, формулировка идеи, структурирование текста, утверждение финальной версии; П.В. Гневашев — редактирование материалов экспериментальных исследований; М.В. Смольников — написание текста рукописи; Г.П. Шишкин — теоретическая разработка материалов рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев В.Ф., Кутушев И.Р., Хамедзянов А.К. Рефракто-магнитооптический метод оценки эксплуатационных и теплотехнических характеристик реактивных и дизельных топлив // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 2. С. 302–314.
2. Николаев В.Ф., Султанова Р.Б., Пеньковский А.И. и др. Методы определения состава и модели описания физико-химических и эксплуатационных свойств многокомпонентных смесей. Уч. пособие. Казань: КНИТУ, 2008.
3. Верещагин А.Л., Балабанова С.С. Рефрактометрический анализ. Бийск: АлтГТУ, 2018.
4. Плотников С.А., Смольников М.В. Исследование показателей процесса сгорания новых этанола-топливных эмульсий // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. Горки: БГСХА, 2019. Вып. 4. С. 159–163.
5. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В. Безмоторный метод оценки альтернативных топлив // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сб. материалов VI Междунар. Науч. Конф. Молодых учёных, Гродно, 2 июня 2022 г. Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. 124–129.

авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Plotnikov — general guidance, formulation of the idea, structuring of the text, approval of the final version; P.V. Gnevashev — editing of experimental research materials; M.V. Smolnikov — writing the text of the manuscript; G.P. Shishkin — theoretical development of manuscript materials. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

6. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В. и др. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив с добавкой этанола // Транспорт на альтернативном топливе. 2022. № 6 (90). С. 72–76.
7. Гневашев П.В., Плотников С.А., Смольников М.В. Безмоторная оценка экспресс-методом свойств биотоплив на основе трёх компонентов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. Горки : БГСХА, 2023. Вып. 8. С. 265–268.
8. Марков В.А., Патрахальцев Н.Н. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе, 2009. № 6. С. 40–46.
9. Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В. и др. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: уч. пособие. М.: Легион-Автодата, 2008.
10. Саблина З.А., Широкова Г.Б., Ермакова Т.И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. М.: Химия, 1978.
11. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. М.: Колос, 1984.

REFERENCES

1. Nikolaev VF, Kutushev IR, Khamedzyanov AK. Refracto-magneto-optical method for assessing the operational and thermal characteristics of jet and diesel fuels. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2003;2:302–314. (In Russ).
2. Nikolaev VF, Sultanova RB, Penkovsky AI, et al. *Methods for determining the composition and models for describing the physical, chemical and operational properties of multicomponent mixtures*. Uch. allowance. Kazan: KNITU; 2008. (In Russ).
3. Vereshchagin AL, Balabanova SS. *Refractometric analysis*. Biysk: AltGTU; 2018. (In Russ).
4. Plotnikov SA, Smolnikov MV. Study of combustion process indicators of new ethanol-fuel emulsions. In: *Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production: collection of articles. scientific tr*. Gorki: BGSKhA; 2019;4:159–163. (In Russ).
5. Gnevashev PV, Plotnikov SA, Smolnikov MV. Non-motorized method for assessing alternative fuels. In: *Engineering and economic support for transport and mechanical engineering: collection of articles. materials of the VI International. Scientific Conf. Young scientists, Grodno, June 2, 2022*. Grodno: GrGU im Yanki Kupaly; 2022:124–129. (In Russ).
6. Gnevashev PV, Plotnikov SA, Smolnikov MV, et al. Non-motorized methods for assessing the performance properties of alternative fuels with the addition of ethanol. *Transport na alternativnom toplive*. 2022;6(90):72–76. (In Russ).
7. Gnevashev PV, Plotnikov SA, Smolnikov MV. Non-motorized assessment of the properties of biofuels based on three components using an express method. In: *Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production: collection of articles. scientific tr*. Gorki: BGSKhA; 2023;8:265–268. (In Russ).
8. Markov VA, Patrahaltsev NN. Alcohol fuels for diesel engines. *Transport na alternativnom toplive*. 2009;6:40–46. (In Russ).
9. Markov VA, Gaivoronsky AI, Grekhov LV, et al. *Operation of diesel engines on non-traditional fuels: textbook. allowance*. Moscow: Legion-Avtodata; 2008. (In Russ).
10. Sablina ZA, Shirokova GB, Ermakova TI. *Laboratory methods for assessing the properties of motor and jet fuels*. Moscow: Khimiya; 1978. (In Russ).
11. Nikolaenko AV. *Theory, design and calculation of automobile and tractor engines*. Moscow: Kolos; 1984. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Плотников Сергей Александрович,

д-р техн. наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»;
адрес: Российская Федерация, 610000, Киров,
ул. Московская, д. 36;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: Plotnikovsa@bk.ru

Гневашев Павел Вячеславович,

аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0009-0008-1131-9195;
eLibrary SPIN: 6103-3921;
e-mail: GnevashevPV@inbox.ru

Смольников Михаил Владимирович,

канд. техн. наук,
ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0009-0006-8911-446X;
eLibrary SPIN: 5580-1330;
e-mail: Mihail.mai@mail.ru

Шишкин Геннадий Петрович,

доцент, канд. пед. наук,
заведующий кафедрой «Физики и медицинской информатики»;
ORCID: 0009-0004-6591-8653;
eLibrary SPIN: 3764-5790;
e-mail: shgp45@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Sergey A. Plotnikov,

Dr. Sci. (Tech.),
Professor of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
address: 36 Moskovskaya street, 610000 Kirov,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: : Plotnikovsa@bk.ru

Pavel V. Gnevashev,

Postgraduate of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
ORCID: 0009-0008-1131-9195;
eLibrary SPIN: 6103-3921;
e-mail: GnevashevPV@inbox.ru

Mikhail V. Smolnikov,

Cand. Sci. (Tech.),
Senior Lecturer of the Technology of Mechanical Engineering
Department;
ORCID: 0009-0006-8911-446X;
eLibrary SPIN: 5580-1330;
e-mail: Mihail.mai@mail.ru

Gennady P. Shishkin,

Associate Professor, Cand. Sci. (Ped.),
Head of the of Physics and Medical Informatics
Department;
ORCID: 0009-0004-6591-8653;
eLibrary SPIN: 3764-5790;
e-mail: shgp45@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author