

Научная статья
УДК 665.75+665.353.3

Определение сжимаемости смесей дизельного топлива с пальмовым маслом

Дмитрий Николаевич Илюшин¹, Алексей Викторович Курапин²,
Евгений Александрович Салыкин³, Евгений Алексеевич Федянов⁴

^{1,2,3,4}Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия

^{1,2,3}tig@vstu.ru

⁴fedyanov@vstu.ru

Аннотация. Одним из путей расширения топливной базы для автотракторных дизельных двигателей является использование альтернативных топлив растительного происхождения. Особенно перспективным является применение топлив растительного происхождения в качестве добавок к нефтяному дизельному топливу. Моделирование рабочего процесса и, в частности процесса впрыскивания, дизелей, работающих на смесях нефтяного дизельного топлива с топливами растительного происхождения, позволяет оценить показатели двигателя на таком топливе и необходимость изменения регулировок топливной аппаратуры. Для моделирования указанных процессов требуется знать сжимаемость смесевых топлив. Проведены опыты по определению сжимаемости нефтяного дизельного топлива с пальмовым маслом. Для определения сжимаемости использован метод, основанный на измерении скорости звука в топливе, находящемся в нагнетательном трубопроводе. Исследована возможность определения сжимаемости не только на основе измерения скорости распространения волны давления, но и на основе измерения скорости распространения волны разрежения. Показано, что с увеличением давления и доли пальмового масла в смесевом топливе скорость звука растет, а сжимаемость уменьшается. Для учета указанных различий сжимаемости топлив на основе смесей пальмового масла и дизельного топлива при расчетах процессов топливоподачи в дизелях, работающих на указанных смесях, предложено аппроксимирующее уравнение для определения истинного коэффициента сжимаемости на основе полиномов второй степени.

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, пальмовое масло, смесевое топливо, впрыскивание топлива, топливоподача, сжимаемость.

Для цитирования: Илюшин Д.Н., Курапин А.В., Салыкин Е.А., Федянов Е.А. Определение сжимаемости смесей дизельного топлива с пальмовым маслом // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Determination mixtures compressibility of diesel fuel with palm oil

Dmitriy N. Ilyushin¹, Alexey V. Kurapin², Evgeniy A. Salykin³, Evgeniy A. Fedyanov⁴

^{1,2,3,4} Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

^{1,2,3}tig@vstu.ru

⁴fedyanov@vstu.ru

Abstract. One of the ways to expand the fuel base for autotractor diesel engines is the use of alternative fuels of vegetable origin. Especially promising is the use of vegetable origin fuels as additives to petroleum diesel fuel. Modeling of the working process and, in particular, the injection process, of diesel engines operating on mixtures of petroleum diesel fuel with fuels of vegetable origin, allows us to evaluate the performance of the engine on such fuel and the need to change the adjustments of the fuel equipment. For modeling these processes, it is required to know the compressibility of mixed fuels. Experiments were carried out to determine the compressibility of petroleum diesel fuel with palm oil. To determine the compressibility, a method based on measuring the speed of sound in the fuel in the injection pipeline was used. The possibility of determining the compressibility not only on the basis of measuring the velocity of propagation of a pressure wave, but also on the basis of measuring the velocity of propagation of a rarefaction wave is investigated. It is shown that with an increase in pressure and the proportion of palm oil in the mixed fuel, the speed of sound increases, and the compressibility decreases. To take into account the indicated differences in the compressibility of fuels based on mixtures of palm oil and diesel fuel when calculating fuel supply processes in diesel engines operating on these mixtures, an approximating equation was proposed to determine the true compressibility coefficient based on polynomials of the second degree.

Key words: diesel engine, diesel fuel, palm oil, mixed fuel, fuel injection, fuel supply, compressibility.

For citation: Ilyushin D.N., Kurapin A.V., Salykin E.A., Fedyanov E.A. Determination mixtures compressibility of diesel fuel with palm oil. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

В настоящее время во многих странах мира наблюдается тенденция расширения топливной базы для дизельных двигателей внутреннего сгорания за счет применения альтернативных топлив растительного происхождения. В большинстве своем такие альтернативные топлива – это различные виды

растительных масел, которые по своим теплофизическим свойствам отличаются от дизельных топлив, вырабатываемых из нефти. Они имеют бóльшую плотность и вязкость, меньшую теплоту сгорания. Для их полного сжигания требуется меньше воздуха, так как они содержат в своем составе некоторое количество кислорода. В связи с указанными отличиями в теплофизических свойствах растительные масла используют, в первую очередь, как добавки к обычному дизельному топливу. Это позволяет применять существующую топливную аппаратуру дизельных двигателей с относительно небольшим изменением ее регулировок. В частности, представляет интерес использование в смесях с нефтяным дизельным топливом пальмового масла. По общемировому объему производства оно занимает первое место среди всех растительных масел [1,2,3]. Пальмовое масло хорошо смешивается с дизельным топливом и остается в составе таких смесей в жидкой фазе даже при температурах, которые ниже температуры застывания чистого пальмового масла [4, 5]. По сравнению с нефтяным дизельным топливом пальмовое масло более вязкое и имеет бóльшую плотность [6]. Оно содержит 8...12 % кислорода. Низшая теплота сгорания пальмового масла составляет 37,1 МДж/кг против 42...43 МДж/кг у дизельных топлив. Повышение добавки пальмового масла до 30 процентов и более заметно увеличивает задержку воспламенения топлива. При использовании в качестве топлива только пальмового масла задержка воспламенения в диапазоне температур 800-950 К возрастает в 2 раза [7].

Важным свойством топлива для дизельных двигателей, влияющим на протекание процесса его впрыскивания, является сжимаемость. Сжимаемость влияет на величину цикловой подачи и в разделенных системах топливоподачи определяет задержку впрыскивания топлива относительно начала хода плунжера топливного насоса.

Основная часть

Сжимаемость определяли по методике проф. И. В. Астахова [8], основанной на измерении скорости распространения в топливе импульса давления, то есть на измерении скорости распространения в нем звуковой волны.

Измерения скорости распространения импульсов давления в смесях нефтяного дизельного топлива с пальмовым маслом были проведены на лабораторной установке, на которой расстояние между датчиками, регистрирующими импульсы давления в нагнетательном трубопроводе от топливного насоса высокого давления к форсунке, составляло 1,4 м. Были использованы датчики с диапазоном рабочих давлений от 0 до 60 МПа. Номинальная погрешность 0,5 % от максимального давления.

Для регистрации и записи сигналов датчиков использованы аналогово-цифровой преобразователь Z230 производства компании Zetlab, работающий в двухканальном режиме, с программным обеспечением Powergraph.

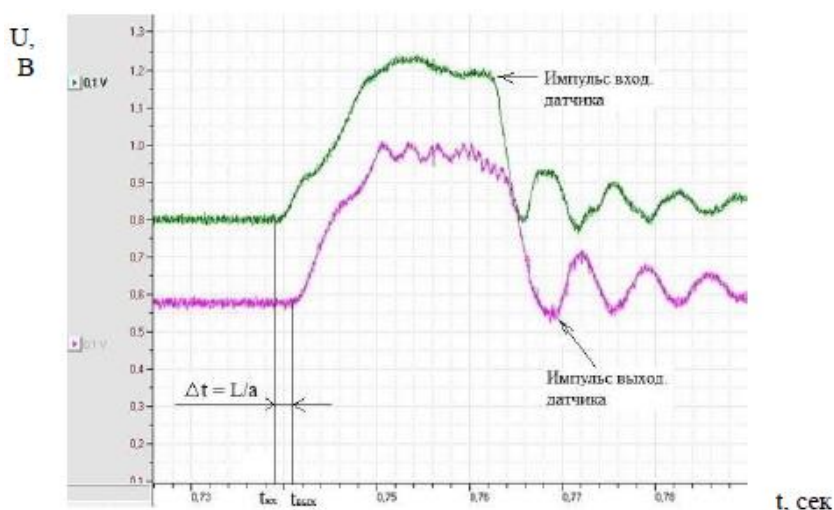


Рис. 1. Осциллограмма распространения импульса давления в трубопроводе

Для оценки случайных погрешностей и воспроизводимости результатов измерений на каждом из выбранных значений начального давления в нагнетательном трубопроводе измерения повторяли сериями из 25 впрыскиваний не менее трех раз.

Пример записи сигналов датчиков давления, установленных на нагнетательном трубопроводе, показан на рисунке 1.

Скорость a распространения волны давления находили как отношение длины L мерного участка нагнетательного трубопровода к временному интервалу Δt между передними фронтами импульсов:

$$a = \frac{L}{\Delta t}. \quad (1)$$

Все опыты были проведены при температуре окружающей среды $t_0 = 22 \dots 24$ °С и атмосферном давлении $p_0 = 102$ кПа. Во время опытов температура перед топливным насосом всех испытанных топлив и топливных смесей поддерживалась равной 50 °С.

Опыты были проведены для дизельного топлива марки ДЛ, пальмового масла и смесей дизельного топлива с пальмовым маслом. Содержание пальмового масла в смесях составляло 10, 20, 30, 40, 50, 60 % по объему. Смесей дизельного топлива ДЛ с пальмовым маслом приготавливались в соответствии с рекомендациями, изложенными в ГОСТ Р 52808-2007 [9]. Для исключения стратификации полученных смесей пальмовое масло перед смешением нагревали до 60...70 °С, приближая его вязкость к вязкости дизельного топлива. Длительность собственно перемешивания составляла 30 минут.

Значения истинного коэффициента сжимаемости β в Па⁻¹, находили по формуле [8]

$$\beta = -\frac{1 + p_n k}{2p_n} + \sqrt{\left(\frac{1 + p_n k}{2p_n}\right)^2 + \frac{1}{a^2 \rho_0 p_n} - \frac{k}{p_n}}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность топлива при нормальных условиях, кг/м³; p_n – заданное начальное давление, Па; k – поправка Ротрока, учитывающая деформацию трубопровода. Поправку Ротрока вычисляли как

$$k = \frac{2}{E} \left(\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right), \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала, из которого изготовлен трубопровод, МПа; R и r – внешний и внутренний радиусы трубопровода, м; μ – коэффициент Пуассона.

На рисунке 2 представлены полученные в результате проведенных опытов зависимости коэффициента сжимаемости β от начального давления p_n для дизельного топлива, пальмового масла и различных по составу смесей этих топлив. Разброс значений коэффициента сжимаемости, оцениваемый коэффициентом вариации, в сериях повторных опытов не превышал 4,5 %. Зависимость коэффициента сжимаемости от давления, найденная для дизельного топлива без добавок пальмового масла, была сопоставлена с аналогичными зависимостями, полученными другими исследователями [10, 11].

Как видно на рисунке 3, найденная нами зависимость $\beta = f(p_n)$ хорошо совпадает с аналогичной зависимостью, полученной Л. В. Греховым для дизельного топлива при температуре 20 °С.

Полученные экспериментально зависимости величины истинного коэффициента сжимаемости от давления для чистого дизельного топлива, смесевых топлив с различным содержанием в них пальмового масла и чистого пальмового масла были аппроксимированы полиномами второй степени вида

$$\beta = a_0 + a_1 p_n + a_2 p_n^2. \quad (4)$$

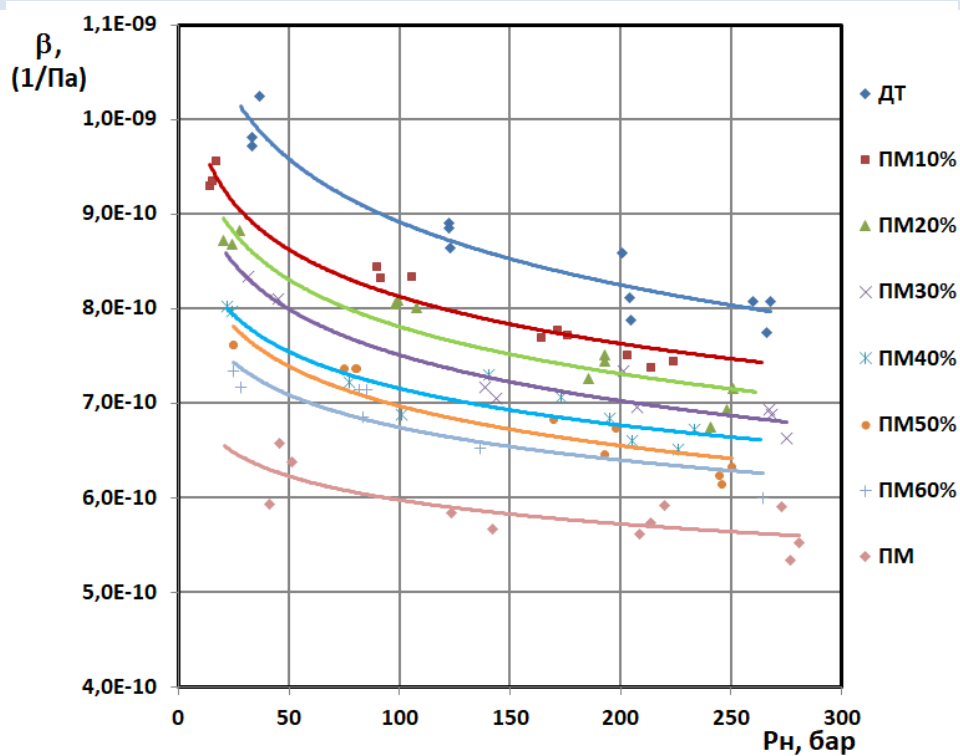


Рис. 2. Зависимости коэффициента сжимаемости β от начального давления при различных составах смесей

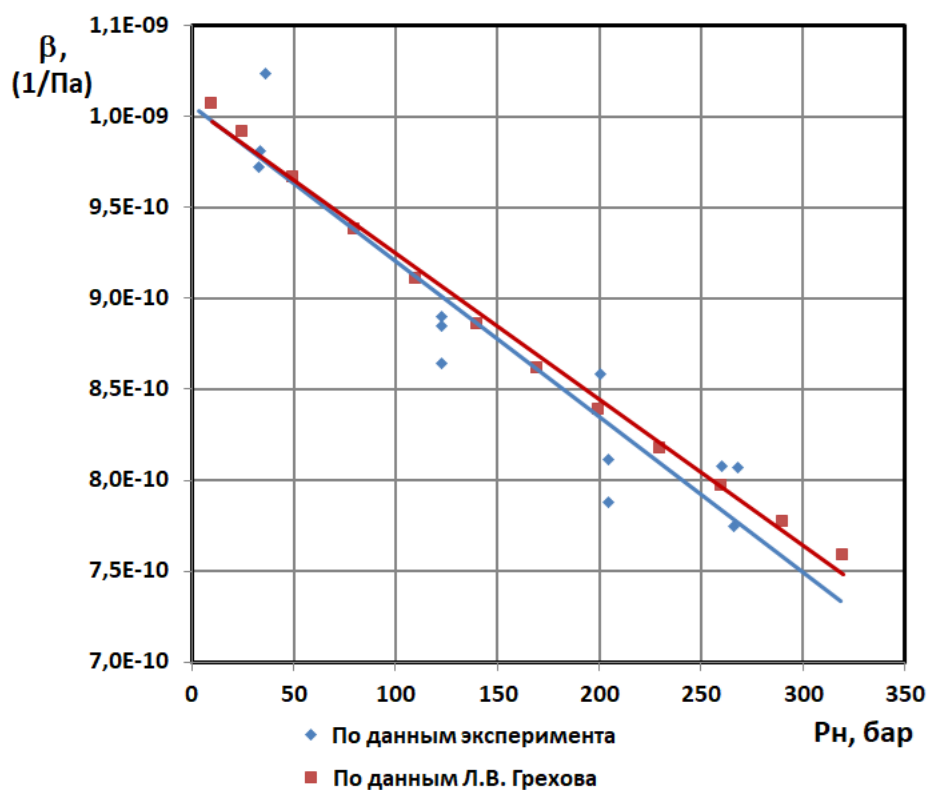


Рис. 3. Зависимости коэффициента сжимаемости β от начального давления для чистого дизельного топлива

В таблице приведены полученные в результате аппроксимации значения коэффициентов полиномов для смесевых топлив различного состава.

Таблица

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

Состав смесевое топливо	Значения коэффициентов		
	a_0	a_1	a_2
100% ДЛ	$1,097 \cdot 10^{-9}$	$-2,371 \cdot 10^{-12}$	$4,618 \cdot 10^{-15}$
90% ДЛ + 10% ПМ	$9,658 \cdot 10^{-10}$	$-1,770 \cdot 10^{-12}$	$3,448 \cdot 10^{-15}$
80% ДЛ + 20% ПМ	$9,344 \cdot 10^{-10}$	$-1,774 \cdot 10^{-12}$	$3,455 \cdot 10^{-15}$
70% ДЛ + 30% ПМ	$9,003 \cdot 10^{-10}$	$-1,726 \cdot 10^{-12}$	$3,361 \cdot 10^{-15}$
60% ДЛ + 40% ПМ	$8,593 \cdot 10^{-10}$	$-1,551 \cdot 10^{-12}$	$2,971 \cdot 10^{-15}$
50% ДЛ + 50% ПМ	$8,264 \cdot 10^{-10}$	$-1,495 \cdot 10^{-12}$	$2,912 \cdot 10^{-15}$
40% ДЛ + 60% ПМ	$8,050 \cdot 10^{-10}$	$-1,404 \cdot 10^{-12}$	$2,673 \cdot 10^{-15}$
100% ПМ	$6,756 \cdot 10^{-10}$	$-9,011 \cdot 10^{-13}$	$1,755 \cdot 10^{-15}$

Как видно из приведенных в таблице данных, коэффициенты полиномов зависят от состава смесевое топлива, т. е.

$$\beta = a_0 + a_1 p_n + a_2 p_n^2 = f_0(g_m) + f_1(g_m) p_n + f_2(g_m) p_n^2, \quad (5)$$

где g_m – доля пальмового масла в смеси топлива.

Для функций $f(g_m)$ также были получены аппроксимирующие их полиномы второй степени:

$$a_0 = 2,066 \cdot 10^{-14} g_m^2 - 5,824 \cdot 10^{-12} g_m + 1,059 \cdot 10^{-9}$$

$$a_1 = -4,372 \cdot 10^{-17} g_m^2 + 1,664 \cdot 10^{-14} g_m - 2,165 \cdot 10^{-12}$$

$$a_2 = 9,802 \cdot 10^{-20} g_m^2 - 3,389 \cdot 10^{-17} g_m + 4,228 \cdot 10^{-15}$$

Подставив аппроксимации для $f(g_m)$ в уравнение (5), получаем формулу для вычисления значения истинного коэффициента сжимаемости в зависимости от начального давления p_n и состава топливной смеси g_m :

$$\begin{aligned} \beta = & (1,059 \cdot 10^{-9} - 5,824 \cdot 10^{-12} g_m + 2,066 \cdot 10^{-14} g_m^2) + \\ & + (-2,164 \cdot 10^{-12} + 1,664 \cdot 10^{-14} g_m - 4,372 \cdot 10^{-17} g_m^2) p_n \\ & + (4,228 \cdot 10^{-15} - 3,389 \cdot 10^{-17} g_m + 9,802 \cdot 10^{-20} g_m^2) p_n^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Определение сжимаемости дизельных топлив при высоких давлениях путем регистрации распространения в них импульсов давления представляет некоторые сложности. В связи с этим была исследована возможность

измерения скорости звука в топливе и, соответственно, определения коэффициента сжимаемости на основе регистрации распространения в нагнетательном трубопроводе волны разрежения. В лабораторной установке волну разрежения создавали, открывая установленную на выходе из трубопровода электрогидравлическую форсунку. Предварительно в трубопроводе насосом устанавливали заданное начальное давление. Результаты измерений таким способом скоростей распространения волны разрежения в нефтяном дизельном топливе приведены на рисунке 4. На этом же рисунке представлены аналогичные результаты, полученные регистрацией распространения волны сжатия. Как видно, при начальных давлениях в нагнетательном трубопроводе, меньших 350 бар, способ, основанный на измерении волны разрежения, дает заниженные результаты. При давлениях, больших 350 бар, результаты измерений обоими методами практически совпадают. Последнее позволяет, в частности, предполагать, что способ определения сжимаемости дизельных топлив, основанный на регистрации распространения волны разрежения, может быть использован в диапазоне давлений, характерных для систем топливоподачи типа Common Rail.

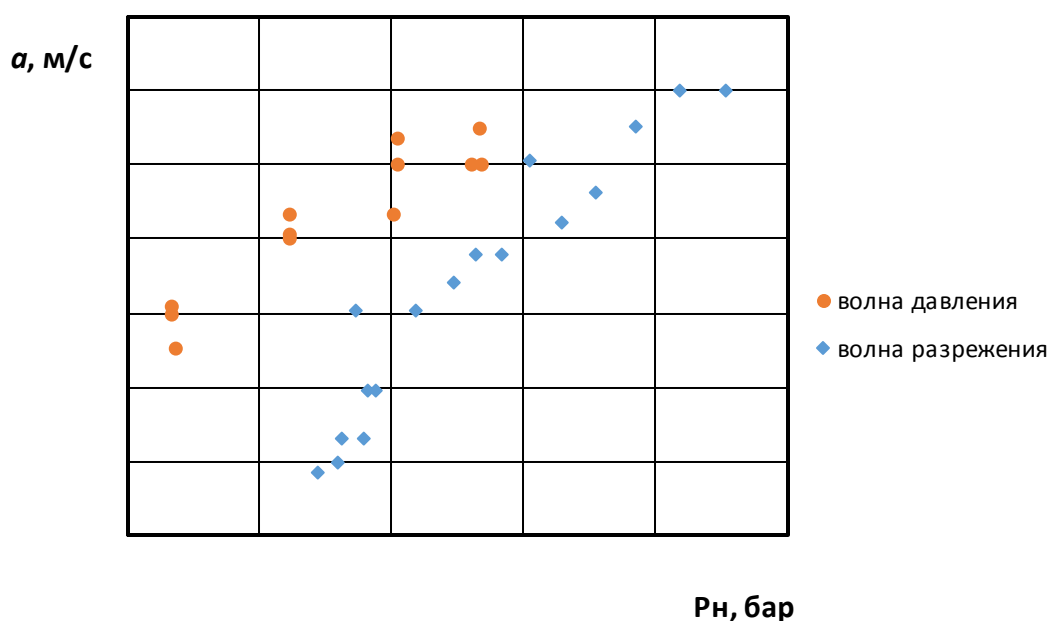


Рис. 4. Значения скоростей звука a для нефтяного дизельного топлива, полученные разными способами

Выводы и рекомендации

Результаты проведенных экспериментов показали, что с увеличением начального давления p_n и доли пальмового масла в смесевом топливе истинный коэффициент сжимаемости β уменьшается. При этом диапазон изменения этой величины с ростом p_n и g_m также уменьшается. При $p_n = 40$ бар сжимаемость дизельного топлива и пальмового масла различаются на 36,56%. При $p_n = 270$ бар – на 29,79%. Формула (6) может быть рекомендована для определения с погрешностью менее 5% значения истинного коэффициента сжимаемости β при расчетах процесса впрыскивания топлива в дизельных двигателях, работающих на смесях дизельного топлива с пальмовым маслом. Для определения сжимаемости дизельных топлив при высоких давлениях, характерных для современных систем топливоподачи, можно определять скорость звука в топливе на основе регистрации распространения в нем волны разрежения.

Список источников

1. Мировые рынки органической масложировой продукции, ориентированные на устойчивое развитие / Н.Д. Аварский, В.В. Таран, Ж.Е. Соколова, Е.А. Силко // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2017. – № 7. – С. 55-63.
2. Борисевич, А.В. Современное состояние российского рынка растительных масел / А.В. Борисевич // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. Вступление. Путь в науку. – 2019. – № 2(26). – С. 44-51.
3. Перспективы использования пальмового масла в качестве топлива для транспортных дизелей / Э.К. Чибанда, В.М. Славущий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2017. – № 4(58). – С. 143-148.
4. Бижаев, А.В. Применение пальмового масла в качестве присадки к топливу тракторных дизельных двигателей / А.В. Бижаев, А.А. Симеон // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 6. – С. 41-46.
5. Mosarof H.H., Kalam M.A., Masjuki H.H. [et al], Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics, Energy conversion and Management, 2015, no. 105, pp. 617–629.

6. Вязкостные характеристики биотоплив на основе растительных масел / В.А. Марков, С.Н. Десянин, С.А. Зыков [и др.] // Грузовик. – 2017. – № 3. – С. 40-46.
7. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода / П.П. Ощепков, И.А. Заев, С.В. Смирнов, А.В. Бижаев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 3. – С. 48-53.
8. Астахов, И.В. Сжимаемость моторных топлив / И.В. Астахов // Энергомашиностроение. – 1960. – № 9. – С. 8–11.
9. ГОСТ Р 52808-2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. – Введ. с 27.12.2007. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 9 с.
10. Methods for calculating fuel heating in electrically controlled injectors of Common Rail diesel systems / Zhao J., Grekhov L., Onishchenko D. [et al.] // Fuel. – 2021. – Vol. 305, art. 121526.
11. Расчет и корректировка упругих свойств моторных топлив и других жидкостей / Л.В. Грехов, В.А. Марков, Н.А. Арсенов, Ц. Чжао // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 7(748). – С. 49–67.

References

1. Avarskij N.D., Taran V.V., Sokolova Zh.E., Silko E.A. *Jekonomika sel'skoxozjajstvennyh i pererabatyvaju-shhih predpriyatij*, 2017, no. 7, pp. 55-63.
2. Borisevich A.V. *Vestnik Rossijskogo jekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plehanova. Vstuplenie. Put' v nauku*, 2019, no. 2(26), pp. 44-51.
3. Chibanda Je.K., Slavuckij V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2017, no. 4(58), pp. 143-148.
4. Bizhaev A.V. *Sel'skoxozjajstvennye mashiny i tehnologii*, 2017, no. 6, pp. 41-46.
5. Mosarof H. H., Kalam M. A., Masjuki H. H. [et al], Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics, *Energy conversion and Management*, 2015, no. 105, pp. 617–629.
6. Markov V.A., Devjanin S.N., Zykov S.A. [et al] *Gruzovik*, 2017, no 3, pp. 40-46.
7. Oshhepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. *Sel'skoxozjajstvennye mashiny i tehnologii*, 2019. T. 13, no. 3, pp. 48-53.
8. Astahov I.V. *Jenergomashinostroenie*, 1960, no. 9, pp. 8–11.
9. Netradicionnye tehnologii. Jenergetika bioothodov. Terminy i opredelenija. GOST R 52808-2007 (Non-traditional technologies. Energy of biowaste. Terms and Definitions, State Standart R 52808-2007), Moscow, Standartinform, 2008, 9 p.
10. Zhao J., Grekhov L. Onishchenko D. [et al.], Methods for calculating fuel heating in electrically controlled injectors of Common Rail diesel systems, *Fuel*. 2021, Vol. 305, art. 121526.

11. Grehov L. V., Markov V. A., Arsenov N. A., Chzhao C. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2022, no. 7(748), pp. 49–67.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Илюшин Дмитрий Николаевич, ст. преподаватель, ВолгГТУ.

Курапин Алексей Викторович, канд. техн. наук, доц., ВолгГТУ

Салыкин Евгений Александрович, канд. техн. наук, доц., ВолгГТУ.

Федянов Евгений Алексеевич, д-р техн. наук, проф., ВолгГТУ.

Information about the authors

Ilyushin Dmitry N., senior lecturer, VSTU.

Kurapin Alexey V., Ph.D., Associate Professor, VSTU.

Salykin Evgeniy A., Ph.D., Associate Professor, VSTU.

Fedyanov Evgeniy A., Dr. Sc., professor, VSTU.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 21.03.2023.