

Энергетика и электротехника

УДК 621.443

Исследование работы линии высокого давления системы питания тракторного дизеля на топливах с добавкой рапсового масла

Ш.В. Бузиков, О.М. Бузикова, М.В. Мотовилова

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Studying the tractor diesel high-pressure fuel supply system operation on fuels with the rapeseed oil addition

Sh.V. Buzikov, O.M. Buzikova, M.V. Motovilova

Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University

Для обеспечения полноценного рабочего процесса в цилиндре тракторного дизеля необходимо надежное и полное поступление топлива в камеру сгорания в соответствии с заданным законом топливоподачи. Бесперебойная подача топлива формируется на линии высокого давления системы питания. Предложен метод определения характеристик топливоподачи с учетом закона ввода теплоты, а также плотности и сжимаемости топлива с добавками рапсового масла. Изложена методика проведения исследований. Приведены результаты и скоростные характеристики работы топливного насоса высокого давления на смесевом топливе с массовой долей рапсового масла 20...60 % при различных положениях рычага управления всережимным регулятором. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что увеличение массовой доли рапсового масла от 0 до 60 % повышает относительное изменение цикловой подачи и активного хода плунжера от 0 до 12 и 15 % соответственно. Сходимость результатов теоретического расчета и экспериментального исследования составила 92 %.

EDN: ZUQZJO, <https://elibrary/zuqzjo>

Ключевые слова: тракторный дизель, рапсовое масло, коэффициент сжимаемости, топливо с добавкой рапсового масла

Ensuring the full-fledged operation process in a tractor diesel engine cylinder requires reliable and complete fuel supply to the combustion chamber in accordance with the specified fuel supply law. Uninterrupted fuel supply is formed in the fuel system high-pressure line. The paper proposes a method for determining the fuel supply characteristics taking into account the law of the heat input, as well as density and compressibility of fuel with the rapeseed oil additives. It presents a methodology for conducting a research. The paper presents results and graphical dependencies of the high-pressure fuel pump speed characteristics operating on the mixed fuel with the rapeseed oil content of 20 ... 60% at different positions of the all-mode regulator control lever. It theoretically establishes and experimentally confirms

that an increase in the rapeseed oil content from 0 to 60% raises relative alteration in the cyclic supply and active plunger stroke from 0 to 12 and 15%, respectively. Convergence of the theoretical computation results with the experimental data constitutes 92%.

EDN: ZUQZJO, <https://elibrary/zuzqjo>

Keywords: tractor diesel, rapeseed oil, compressibility coefficient, fuel with the rapeseed oil additive

В области двигателестроения наблюдается тенденция к развитию альтернативных технологий.

Однако двигатели внутреннего сгорания (ДВС), особенно дизели, остаются значимыми для существующих и будущих силовых установок. Благодаря преимуществу в экономии топлива дизель выступает как потенциальный основной ДВС для изделий тракторной промышленности. Тракторный дизель (ТД) характеризуется хорошей адаптивностью и совместимостью с альтернативными видами топлив, что делает их незаменимыми для экономики страны [1, 2].

Адаптация существующего ТД к работе на альтернативном топливе является самой привлекательной стратегией для исследователей в области ДВС и тракторостроительных компаний. К достоинствам такого подхода относятся минимальные требования к модернизации оборудования, уменьшение зависимости от традиционного углеводородного топлива и снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Дизельное топливо (ДТ) с добавкой рапсового масла (РМ) принято считать одним из наиболее подходящих альтернативных видов топлива для дизелей. К основным условиям, связанным с эксплуатацией ТД на топливе с добавкой РМ, относится соблюдение заданного закона топливоподачи [3–5]. Невыполнение этого закона приводит к нарушению рабочего процесса в цилиндрах ТД [6, 7].

В ранее проведенных исследованиях [8] рассмотрено влияние смесового топлива (СТ) на основе РМ на период задержки воспламенения в зависимости от показателей сжимаемости топлива. Выявлено уменьшение периода задержки воспламенения с увеличением содержания РМ в СТ относительно этого параметра ДТ, что обусловлено более высоким цетановым числом и меньшей сжимаемостью РМ.

Для определения плотности, сжимаемости и объемного теплового расширения сложных углеводородных смесей на основе ДТ разработан прогностический метод [9] с использованием уравнения состояния статистической ас-

социативной жидкости и теории возмущенных цепей (PC-SAFT). Этот метод требует ввода только двух расчетных или экспериментальных (измеренных) свойств — усредненной молекулярной массы и отношения водорода к углероду.

Вычислительные модели [10, 11] позволяют прогнозировать свойства альтернативного топлива. В настоящее время для прогнозирования некоторых свойств СТ применяют метод FT-NIR, обеспечивающий устойчивость алгоритма расчета к изменениям, применяемым в экспериментальных методиках. Результаты экспериментов по методу FT-NIR выявили возможности для многоуровневой вычислительной оптимизации существующих и новых альтернативных топлив.

В последние годы вычислительная оценка НЕНД стала основным фактором для разработки новых видов альтернативного топлива. Авторами статьи [12] предложена новая методика для ускорения разработки углеводородных топлив на основе машинного обучения. Проведены экспериментальные исследования по поиску новых видов альтернативного топлива с заданными свойствами. Создана база данных, содержащая молекулярные структуры и свойства 342 видов альтернативного топлива, на основе которой выполнено машинное обучение.

Рабочий процесс ТД зависит от характеристики сжимаемости топлива. В работе [13] приведена модель сжимаемости Эйлера для описания процесса впрыска топлива в областях, охватывающих как внутренние каналы форсунок, так и зоны смешивания в камере сгорания дизеля. Изменения коэффициента сжимаемости и плотности топлива определяли, используя не модель испарения Лагранжа, а EOS [13]. Предложенная модель учитывает массу топлива и перенос импульса, наблюдаемый в форсунке.

В статье [14] исследовано влияние сжимаемости топлива на моделирование внутреннего потока в сопле форсунки. Плотность и сжимаемость представлены как функции давления и температуры в широком диапазоне граничных условий.

В связи с этим возникает проблема применения топлив, имеющих различные значения плотности и сжимаемости в линии высокого давления системы питания, так как это может привести к изменению закона подачи топлива. Также следует отметить, что самым важным показателем закона топливоподачи является ввод количества теплоты с топливом в цилиндры дизеля [3, 15, 16].

Цель работы — определение характеристик топливоподачи ТД при работе на ДТ с добавкой РМ.

Научная новизна состоит в разработке метода определения характеристик топливоподачи с учетом закона ввода теплоты, а также плотности и сжимаемости топлива с добавкой РМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить три задачи: теоретически определить относительное изменение цикловой подачи топлива исходя из равенства ввода теплоты в зависимости от плотности, вязкости и массовой доли РМ в СТ; вычислить относительное изменение активного хода плунжера в зависимости от плотности, сжимаемости и массовой доли РМ в СТ; экспериментально подтвердить теоретические предположения.

При работе ТД на СТ необходимо соблюдать условие, при котором введенное количество теплоты с цикловой подачей будет соответствовать работе на ДТ:

$$q_{ц}^{ДТ} \rho_{ДТ} H_u^{ДТ} = q_{ц}^{СТ} \rho_{СТ} H_u^{СТ},$$

где $q_{ц}^{ДТ}$ и $q_{ц}^{СТ}$ — цикловая подача ДТ и СТ, см³/цикл; $\rho_{ДТ}$ и $\rho_{СТ}$ — плотность ДТ и СТ, г/см³; $H_u^{ДТ}$ и $H_u^{СТ}$ — расчетная низшая теплота сгорания ДТ и СТ, Дж/г.

Так как плотность и расчетная низшая теплота сгорания топлива являются аддитивными величинами [3, 4], цикловая подача СТ имеет вид

$$q_{ц}^{СТ} = \frac{q_{ц}^{ДТ} \rho_{ДТ} H_u^{ДТ}}{[\rho_{ДТ} - m(\rho_{ДТ} + \rho_{РМ})]} \times \frac{1}{[H_u^{ДТ} - m(H_u^{ДТ} + H_u^{РМ})]}, \quad (1)$$

где $\rho_{РМ}$ — плотность РМ, г/см³; $H_u^{РМ}$ — расчетная низшая теплота сгорания РМ, Дж/г; m — массовая доля РМ, %.

Относительное изменение цикловой подачи топлива

$$\frac{q_{ц}^{СТ}}{q_{ц}^{ДТ}} = \frac{\rho_{ДТ} H_u^{ДТ}}{[\rho_{ДТ} - m(\rho_{ДТ} + \rho_{РМ})]} \times \frac{1}{[H_u^{ДТ} - m(H_u^{ДТ} + H_u^{РМ})]} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

В общем виде уравнение статической теории впрыска топлива определяется как [15]

$$f_{пл} h_{пл} = \beta V p_{ср} + q_{ц},$$

где $f_{пл}$ — площадь плунжера, см²; $h_{пл}$ — активный ход плунжера, см; β — среднее значение коэффициента сжимаемости топлива, Па⁻¹; V — суммарный объем полости высокого давления, см³; $p_{ср}$ — среднее давление в полости высокого давления, Па.

С учетом выражения (1) активный ход плунжера при работе топливного насоса высокого давления (ТНВД) на СТ имеет вид

$$h_{пл}^{СТ} = \frac{1}{f_{пл}} \left\{ \beta_{СТ} V p_{ср} + \frac{q_{ц}^{ДТ} \rho_{ДТ} H_u^{ДТ}}{[\rho_{ДТ} - m(\rho_{ДТ} + \rho_{РМ})]} \times \frac{1}{[H_u^{ДТ} - m(H_u^{ДТ} + H_u^{РМ})]} \right\}.$$

Относительное изменение активного хода плунжера

$$\frac{h_{пл}^{СТ}}{h_{пл}^{ДТ}} = \frac{1}{\beta_{ДТ} V p_{ср} + q_{ц}^{ДТ}} \left\{ \beta_{СТ} V p_{ср} + \frac{q_{ц}^{ДТ} \rho_{ДТ} H_u^{ДТ}}{[\rho_{ДТ} - m(\rho_{ДТ} + \rho_{РМ})]} \times \frac{1}{[H_u^{ДТ} - m(H_u^{ДТ} + H_u^{РМ})]} \right\} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Используя выражение (2), можно определить относительное изменение цикловой подачи топлива исходя из равенства ввода теплоты в зависимости от плотности и массовой доли РМ в СТ. С помощью выражения (3) можно найти относительное изменение активного хода плунжера в зависимости от плотности, коэффициента сжимаемости и массовой доли РМ в СТ.

Результаты теоретического расчета, полученные по выражениям (2) и (3), при работе ТНВД ЯЗДА (773-40.02) (773.1111005-40.02) на СТ с добавками РМ приведены в таблице.

Результаты теоретического расчета

Вид топлива	$q_{ц}^{СТ}/q_{ц}^{ДТ}$, %	$h_{пл}^{СТ}/h_{пл}^{ДТ}$, %
ДТ	—	—
80 % ДТ + 20 % РМ	5	4
60 % ДТ + 40 % РМ	10	8
40 % ДТ + 60 % РМ	15	12



Рис. 1. Внешний вид стенда КИ-22210-02М-15 для испытания и регулирования топливной аппаратуры ТД

Для подтверждения результатов теоретического расчета проведены экспериментальные исследования работы топливной аппаратуры на СТ разного состава. В исследованиях использованы ТНВД ЯЗДА 773-40.02 (773.1111005-40.02) и 12-секционный стенд КИ-22210-02М-15 для испытания и регулирования топливной аппаратуры, оснащенный системой фиксирующего, регистрирующего и обрабатывающего оборудования (рис. 1).

Исследования выполняли согласно методике ГОСТ 10578–95. Частоту вращения кулачкового

вала ТНВД поддерживали в диапазоне частот 100...1000 мин⁻¹. Для каждого состава СТ перед экспериментом проводили перерегулировку параметров работы ТНВД. Для сохранения нагрузочно-скоростных режимов ТД, соответствующих его работе на ДТ, изменяли характеристики работы всережимного регулятора частоты вращения коленчатого вала (далее всережимный регулятор) и корректора.

По результатам исследования работы ТНВД получены его скоростные характеристики при работе на ДТ и СТ с массовой долей РМ 0...60 % в различных положениях рычага управления всережимным регулятором (рис. 2). Скоростные характеристики ТНВД приведены в виде графических зависимостей цикловой подачи топлива $q_{ц}$ и неравномерности подачи топлива по секциям ТНВД (далее неравномерность подачи топлива) $\Delta_{ц}$ от частоты вращения кулачкового вала $n_{т}$. Частота вращения $n_{т} = 600$ мин⁻¹ соответствовала началу действия корректора ТНВД, $n_{т} = 900$ мин⁻¹ — концу его действия, а $n_{т} = 700$ мин⁻¹ — максимальной коррекции.

При работе ТНВД по скоростной характеристике (рис. 2, а) увеличение содержания РМ до 60 % в СТ привело к повышению цикловой подачи топлива $q_{ц}$: от 0,170 до 0,183 см³/цикл при частоте вращения $n_{т}$, соответствующей пуску ТД; от 0,018 до 0,020 см³/цикл при $n_{т}$, соответствующей минимальной частоте вращения холостого хода ТД; от 0,098 до 0,10 см³/цикл при $n_{т}$, соответствующей началу рабочего режима; от 0,118 до 0,128 см³/цикл при $n_{т}$, соответствующей началу действия корректора; от 0,130 до

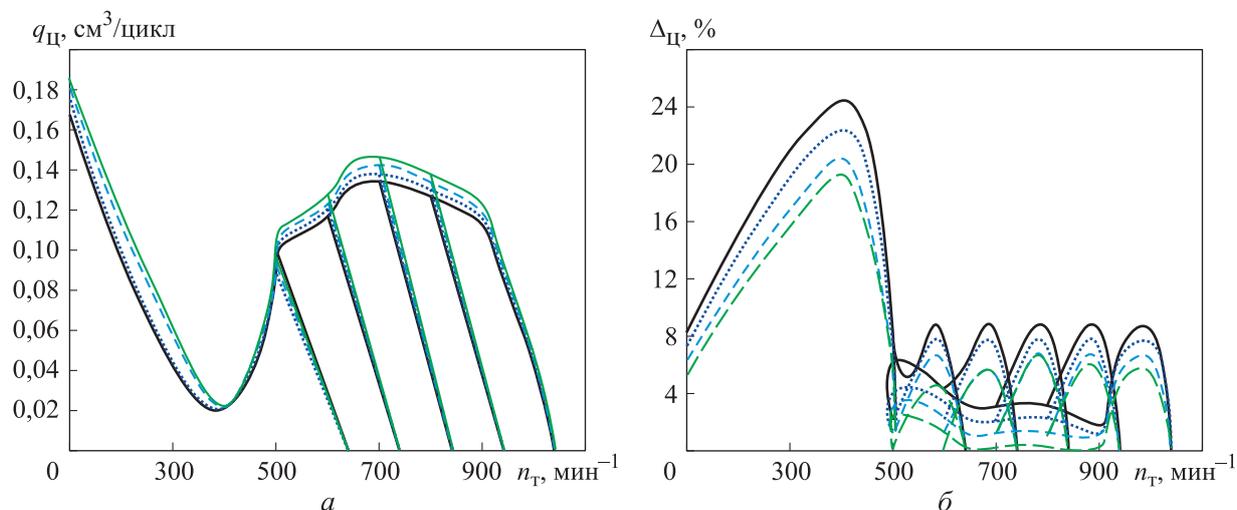


Рис. 2. Скоростные характеристики ТНВД при работе на различных видах топлива: — ДТ; — 80 % ДТ + 20 % РМ; - - - - 60 % ДТ + 20 % РМ; — — — — 40 % ДТ + 20 % РМ

0,150 см³/цикл при n_t , соответствующей максимальной коррекции и максимальному крутящему моменту ТД; от 0,110 до 0,120 см³/цикл при n_t , соответствующей окончанию действия корректора и номинальной подаче топлива. При частоте вращения n_t , соответствующей окончанию подачи топлива и максимальной частоте вращения холостого хода ТД, $q_{ц} = 0$.

При работе ТНВД по предельной и частичным регуляторным характеристикам (см. рис. 2, а) увеличение массовой доли РМ в СТ до 60 % привело к повышению цикловой подачи топлива $q_{ц}$ в среднем на 15 % при частотах вращения n_t , соответствующих окончанию действия всережимного регулятора в положениях рычага управления 100, 85, 70, 55 и 40 %. Это подтверждает сделанные ранее теоретические предположения. Сходимость результатов теоретического расчета и экспериментального исследования составила 92 %.

При работе ТНВД на ДТ и установлении рычага управления всережимным регулятором в положение 100 % (рис. 2, б) увеличение частоты вращения n_t от 100 до 400 мин⁻¹ привело к повышению неравномерности подачи топлива $\Delta_{ц}$ от 8,2 до 24,4 %, а возрастание n_t до 500 мин⁻¹ — к ее уменьшению до 6,2 %. При работе ТНВД в диапазоне частоты вращения n_t , соответствующем действию корректора, неравномерность подачи топлива $\Delta_{ц}$ снизилась от 4,3 до 1,8 %. При срабатывании всережимного регулятора с понижением цикловой подачи топлива $q_{ц}$ неравномерность ее подачи $\Delta_{ц}$ сначала возросла до 8,7 %, а затем резко упала до нуля.

Работа ТНВД на СТ, содержащем 80 % ДТ и 20 % РМ, привела к уменьшению неравномерности подачи топлива $\Delta_{ц}$ во всем диапазоне частоты вращения n_t при аналогичных режимах работы: от 8,2 до 7,2 %, от 24,4 до 22,4 %, от 6,2 до 4,2 %, от 4,3 до 3,3 %, от 1,8 до 1,3 %, от 8,7 до 7,7 %.

Увеличение содержания РМ в СТ до 40 и 60 % также снизило неравномерность подачи топлива $\Delta_{ц}$ во всем диапазоне n_t при аналогичных режимах работы: от 7,2 до 6,2 и 5,2 %, от 22,4 до 20,4 и 19,3 %, от 4,2 до 3,2 и 2,0 %, от 3,3 до 2,4 и 1,4 %, от 1,3 до 1,2 и 0 %, от 7,7 до 6,6 и 5,7 %.

При установлении рычага управления всережимным регулятором в положение 85 % ча-

стота вращения n_t , обеспечивающая максимальную неравномерность подачи топлива $\Delta_{ц} = 8,7$ %, сместилась в сторону уменьшения до $n_t = 880$ мин⁻¹. Аналогичные изменения произошли при работе на СТ, содержащем 20, 40 и 60 % РМ, неравномерность подачи топлива которых равнялась 7,7, 6,6 и 6,0 % соответственно.

При перемещении рычага управления всережимным регулятором в положение 70 % частота вращения n_t снизилась до 780 мин⁻¹. Максимальная неравномерность подачи топлива составила, %: ДТ — 8,7, СТ с массовой долей РМ 20 % — 7,7; СТ, содержащего 40 и 60 % РМ, — 6,6.

При установлении рычага управления всережимным регулятором в положения 55 и 40 % частота вращения n_t уменьшилась до 680 и 580 мин⁻¹ соответственно. Максимальная неравномерность подачи топлива составила, %: ДТ — 8,7; СТ с массовой долей РМ 20 % — 7,7; СТ, содержащей 40 % РМ, — 6,6; СТ с массовой долей РМ 60 % — 6,0.

Таким образом, работа ТНВД соответствует требованиям ГОСТ 10578–2020 и ТУ завода-изготовителя для СТ, содержащего до 60 % РМ [16].

Выводы

1. Теоретически определены значения относительного изменения цикловой подачи исходя из равенства ввода теплоты в зависимости от плотности, вязкости и массовой доли РМ в СТ.

2. Установлено, что с увеличением массовой доли РМ в СТ относительное изменение цикловой подачи повышается от 0 до 12 %, а относительное изменение активного хода плунжера — от 0 до 15 %.

3. Экспериментально подтверждено, что с увеличением содержания РМ в СТ от 0 до 60 %, цикловая подача топлива увеличивается в среднем на 15 % при частотах вращения кулачкового вала ТНВД, соответствующих окончанию действия всережимного регулятора в положениях рычага управления 100, 85, 70, 55 и 40 %. Сходимость результатов теоретического расчета и экспериментального исследования составила 92 %.

Литература

- [1] Venkatesan V., Nallusamy N., Nagapandiselvi P. Performance and emission analysis on the effect of exhaust gas recirculation in a tractor diesel engine using pine oil and soapnut oil methyl ester. *Fuel*, 2021, vol. 290, art. 120077, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120077>
- [2] Pham Q., Park S., Agarwal A.K. et al. Review of dual-fuel combustion in the compression-ignition engine: spray, combustion, and emission. *Energy*, 2022, vol. 250, art. 123778, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123778>
- [3] Бузиков Ш.В., Плотников С.А., Козлов И.С. Определение предельной концентрации рапсового масла в смесевом топливе применяемое в дизеле. *Вестник транспорта Поволжья*, 2021, № 1, с. 72–79.
- [4] Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Литвинов П.В. Влияние свойств разноразных топлив для дизелей на характеристики топливоподачи. *Вестник СибАДИ*, 2016, № 2, с. 44–50.
- [5] Бондаренко Н.И. Устойчивая разностная схема решения задачи неустановившегося движения вязкого потока в трубе. *Тенденции развития науки и образования*, 2021, № 79-2, с. 109–112, doi: <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-75>
- [6] Liu L., Peng Y., Huang L. et al. Evaluation of impingement effects on high-power diesel engine mixing process with an optimized stochastic combustion model. *Fuel*, 2022, vol. 328, art. 125239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125239>
- [7] Khuong L.S., Hashimoto N., Fujita O. Spray, droplet evaporation, combustion, and emission characteristics of future transport fuels for compression-ignition engines: a review. *J. Traffic Transp. Eng.*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 575–613, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.04.003>
- [8] Aldhaidhawi M., Chiriac R., Badescu V. Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with rapeseed biodiesel — a literature review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2017, vol. 73, pp. 178–186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.129>
- [9] Roknia H.B., Guptac A., Moorec J.D. et al. Purely predictive method for density, compressibility, and expansivity for hydrocarbon mixtures and diesel and jet fuels up to high temperatures and pressures. *Fuel*, 2019, vol. 236, pp. 1377–1390, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.041>
- [10] Bediaga H., Moreno M.I., Arrasate S. et al. Multi-output chemometrics model for gasoline compounding. *Fuel*, 2022, vol. 310-A, art. 122274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122274>
- [11] Yusri I.M. A review on the application of response surface method and artificial neural network in engine performance and exhaust emissions characteristics in alternative fuel. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2018, vol. 90, pp. 665–686, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.095>
- [12] Li G., Hu Z., Hou F. et al. Machine learning enabled high-throughput screening of hydrocarbon molecules for the design of next generation fuels. *Fuel*, 2020, vol. 265, art. 116968, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116968>
- [13] Knudsen E., Doran E.M., Mittal V. et al. Compressible Eulerian needle-to-target large eddy simulations of a diesel fuel injector. *Proc. Combust. Inst.*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 2459–2466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.08.016>
- [14] Salvador F.J., De la Morena J., Martínez-López J. et al. Assessment of compressibility effects on internal nozzle flow in diesel injectors at very high injection pressures. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 132, pp. 221–230, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.032>
- [15] Марков В.А., ред. *Моторные топлива, производимые из растительных масел*. Рига, Lambert Academic, 2019. 420 с.
- [16] Бузиков Ш.В. Анализ концепций исследования применения альтернативных топлив в дизелях. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2022, № 1, с. 66–70.

References

- [1] Venkatesan V., Nallusamy N., Nagapandiselvi P. Performance and emission analysis on the effect of exhaust gas recirculation in a tractor diesel engine using pine oil and soapnut oil

- methyl ester. *Fuel*, 2021, vol. 290, art. 120077, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120077>
- [2] Pham Q., Park S., Agarwal A.K. et al. Review of dual-fuel combustion in the compression-ignition engine: spray, combustion, and emission. *Energy*, 2022, vol. 250, art. 123778, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123778>
- [3] Buzikov Sh.V., Plotnikov S.A., Kozlov I.S. Determination of the limit concentration of rapeseed oil in blended fuels used in diesel engines. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2021, no. 1, pp. 72–79. (In Russ.).
- [4] Vedruchenko V.R., Kraynov V.V., Litvinov P.V. The influence of properties of different brands of fuel for diesel engine on characteristics of fuel feeding. *Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]*, 2016, no. 2, pp. 44–50. (In Russ.).
- [5] Bondarenko N.I. Stable difference scheme for solving the problem of unsteady viscous flow in a pipe. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2021, no. 79-2, pp. 109–112, doi: <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-75> (in Russ.).
- [6] Liu L., Peng Y., Huang L. et al. Evaluation of impingement effects on high-power diesel engine mixing process with an optimized stochastic combustion model. *Fuel*, 2022, vol. 328, art. 125239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125239>
- [7] Khuong L.S., Hashimoto N., Fujita O. Spray, droplet evaporation, combustion, and emission characteristics of future transport fuels for compression-ignition engines: a review. *J. Traffic Transp. Eng.*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 575–613, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.04.003>
- [8] Aldhaidhawi M., Chiriac R., Badescu V. Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with rapeseed biodiesel — a literature review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2017, vol. 73, pp. 178–186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.129>
- [9] Roknia H.B., Guptac A., Moorec J.D. et al. Purely predictive method for density, compressibility, and expansivity for hydrocarbon mixtures and diesel and jet fuels up to high temperatures and pressures. *Fuel*, 2019, vol. 236, pp. 1377–1390, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.041>
- [10] Bediaga H., Moreno M.I., Arrasate S. et al. Multi-output chemometrics model for gasoline compounding. *Fuel*, 2022, vol. 310-A, art. 122274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122274>
- [11] Yusri I.M. A review on the application of response surface method and artificial neural network in engine performance and exhaust emissions characteristics in alternative fuel. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2018, vol. 90, pp. 665–686, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.095>
- [12] Li G., Hu Z., Hou F. et al. Machine learning enabled high-throughput screening of hydrocarbon molecules for the design of next generation fuels. *Fuel*, 2020, vol. 265, art. 116968, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116968>
- [13] Knudsen E., Doran E.M., Mittal V. et al. Compressible Eulerian needle-to-target large eddy simulations of a diesel fuel injector. *Proc. Combust. Inst.*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 2459–2466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.08.016>
- [14] Salvador F.J., De la Morena J., Martínez-López J. et al. Assessment of compressibility effects on internal nozzle flow in diesel injectors at very high injection pressures. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 132, pp. 221–230, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.032>
- [15] Markov V.A., ed. *Motornye topliva, proizvodimye iz rastitelnykh masel [Motor fuels produced from vegetable oils]*. Riga, Lambert Academic Publ., 2019. 420 p. (In Russ.).
- [16] Buzikov Sh.V. Analysis of research concepts for the use of alternative fuels in diesels. *Transport na alternativnom toplive [Alternative Fuel Transport]*, 2022, no. 1, pp. 66–70. (In Russ.).

Информация об авторах

БУЗИКОВ Шамиль Викторович — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства. ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: shamilvb@mail.ru).

БУЗИКОВА Олеся Михайловна — кандидат биологических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и инженерных систем. ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: nimf04ka@mail.ru).

МОТОВИЛОВА Марина Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и инженерных систем. ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: marina_mtd@mail.ru).

Information about the authors

BUZIKOV Shamil Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial Safety and Engineering Systems. Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: shamilvb@mail.ru).

BUZIKOVA Olesya Mikhailovna — Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Department of Industrial Safety and Engineering Systems. Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: nimf04ka@mail.ru).

MOTOVILOVA Marina Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial Safety and Engineering Systems. Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: marina_mtd@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бузиков Ш.В., Бузикова О.М., Мотовилова М.В. Исследование работы линии высокого давления системы питания тракторного дизеля на топливах с добавкой рапсового масла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 92–99.

Please cite this article in English as:

Buzikov Sh.V., Buzikova O.M., Motovilova M.V. Studying the tractor diesel high-pressure fuel supply system operation on fuels with the rapeseed oil addition. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 92–99.