

Научная статья  
УДК 621.43:665.353.3

## Экспериментальное определение сжимаемости топлив для дизельных двигателей

Дмитрий Николаевич Илюшин<sup>1</sup>, Алексей Викторович Курапин<sup>2</sup>,  
Евгений Александрович Салыкин<sup>3</sup>, Евгений Алексеевич Федянов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия

<sup>1,2,3</sup>tig@vstu.ru

<sup>4</sup>fedyanov@vstu.ru

**Аннотация.** Расширение спектра предлагаемых к применению в дизельных двигателях смесевых топлив, получаемых добавками растительных масел к дизельному топливу, вызывает необходимость определения теплофизических свойств этих топлив, которые влияют на протекание рабочего процесса и показатели двигателя. В частности, на процесс топливоподачи влияет величина сжимаемости топлива. Значение сжимаемости смесевых топлив с заданным соотношением компонентов не может быть вычислено по известным значениям этой величины для дизельного топлива и растительных масел и определяется экспериментально. В работе дано описание лабораторной установки для определения сжимаемости смесевых топлив и изложена предлагаемая методика проведения опытов и обработки их результатов. Экспериментальное определение величины сжимаемости основано на измерении скорости звука в топливе. В данном исследовании скорость звука определялась путем регистрации распространения волны падения давления в нагнетательном трубопроводе при открытии электрогидроуправляемой форсунки. Методика обработки результатов измерений позволяет получить формулу, связывающую сжимаемость с давлением и составом смесевых топлив. Работоспособность экспериментальной установки и применимость предлагаемой методики подтверждается сравнением значений сжимаемости, найденной для дизельного топлива, с известными аналогичными данными, полученными другими исследователями.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, дизельное топливо, впрыскивание топлива, топливоподача, сжимаемость.

**Для цитирования:** Илюшин Д.Н., Курапин А.В., Салыкин Е.А., Федянов Е.А. Экспериментальное определение сжимаемости топлив для дизельных двигателей // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 2 (44).

Original article

## Experimental determination of fuel compressibility for diesel engines

Dmitriy N. Ilyushin<sup>1</sup>, Alexey V. Kurapin<sup>2</sup>, Evgeniy A. Salykin<sup>3</sup>, Evgeniy A. Fedyanov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

<sup>1,2,3</sup>tig@vstu.ru

<sup>4</sup>fedyanov@vstu.ru

**Abstract.** The expansion of the range of blended fuels offered for use in diesel engines, obtained by additives of vegetable oils to diesel fuel, necessitates the determination of the thermophysical properties of these fuels, which affect the flow of the working process and engine performance. In particular, the fuel supply process is influenced by the amount of fuel compressibility. The compressibility value of mixed fuels with a given component ratio cannot be calculated from known values of this value for diesel fuel and vegetable oils and is determined experimentally. The paper describes a laboratory installation for determining the compressibility of mixed fuels and describes the proposed methodology for conducting experiments and processing their results. The experimental determination of the compressibility value is based on measuring the speed of sound in the fuel. In this study, the speed of sound was determined by recording the propagation of a pressure drop wave in the discharge pipeline when an controlled nozzle was opened. The method of processing the measurement results allows us to obtain a formula linking compressibility with pressure and the composition of the mixed fuel. The operability of the experimental setup and the applicability of the proposed technique is confirmed by comparing the compressibility values found for diesel fuel with known similar data obtained by other researchers.

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, fuel injection, fuel supply, compressibility.

**For citation:** Ilyushin D.N., Kurapin A.V., Salykin E.A., Fedyanov E.A. Experimental determination of fuel compressibility for diesel engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 2 (44).

### Введение

Двигатели внутреннего сгорания остаются основным типом силовых установок наземных транспортных машин. Более того, общее число находящихся в эксплуатации транспортных машин, в частности автомобилей, с двигателями внутреннего сгорания увеличивается. В связи с этим остается актуальной проблема расширения топливной базы за счет

применения альтернативных нефтяным видов топлива. Для дизельных двигателей, особенно для двигателей сельскохозяйственных, строительных машин и машин специального назначения в качестве альтернативных топлив могут быть использованы различные виды растительных масел. При этом проведенные исследования свидетельствуют о том, что их целесообразно применять, прежде всего, в смеси с нефтяным дизельным топливом.

Для того чтобы в дизелях, работающих на смесевых топливах, получить высокие топливно-экономические и экологические показатели, необходима адаптация их рабочего процесса под свойства таких топлив. В первую очередь, как показывает опыт, требуется изменение регулировок системы топливоподачи. Априори определить необходимые регулировки топливной аппаратуры для применения того или иного вида смесевого топлива можно, используя математические модели рабочего процесса и процесса впрыскивания топлива [1]. Учет физических свойств топлива в этих моделях является обязательным.

Одним из важнейших физических свойств топлив, которое влияет на процесс топливоподачи в дизельных двигателях, является сжимаемость. Это свойство характеризуют коэффициентом сжимаемости или модулем упругости.

Расширение спектра применяемых в дизелях смесевых топлив требует совершенствования существующих методов определения этого параметра и создания методик и соответствующего лабораторного оборудования, позволяющих с минимальными затратами получать надежные данные о сжимаемости смесевых топлив в широком диапазоне изменения их состава, давлений и температур [2, 3]. В частности, желательно определять сжимаемость топлив в условиях максимально близких к условиям в системе топливоподачи современных дизельных двигателей.

Целью данной работы является определение коэффициентов сжимаемости смесевых топлив при использовании установки, созданной на базе системы топливоподачи аккумуляторного типа.

### Основная часть

Мерой сжимаемости жидкости служит коэффициент сжимаемости  $\beta$ :

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dp}, \text{ (1/Па)} \quad (1)$$

где  $V$  – объем, занимаемый топливом при давлении  $p$ .

Средний коэффициент сжимаемости  $\beta_{\text{ср}}$  обычно определяют при изменении давления от атмосферного до выбранного предельного избыточного давления  $p$ :

$$\beta_{\text{ср}} = \frac{\Delta V}{V \cdot p}, \text{ (1/Па)} \quad (2)$$

где  $\Delta V$  – уменьшение объёма топлива при повышении давления от атмосферного до  $p$ .

Коэффициент  $\beta_{\text{ср}}$  характеризует среднюю сжимаемость топлива в рассматриваемом диапазоне изменения давлений.

Известные методы определения сжимаемости жидкостей можно условно разделить на две основные группы: методы, основанные на измерении изменения объема жидкости при повышении давления, и методы, основанные на измерении скорости звука в жидкости при повышении ее плотности, вызванном увеличением давления.

В настоящей работе использован метод, заключающийся в фиксации и измерении скорости волн возмущений, распространяющихся с местной скоростью звука, возникающих при открытии форсунки, находящейся на конце трубопровода высокого давления, соединенного с гидроаккумулятором. Для определения значения коэффициента сжимаемости используется известная зависимость между скоростью звука и сжимаемостью жидкости:

$$a^2 = \frac{1}{\rho \cdot \beta} \quad (3)$$

где  $a$  – скорость звука в жидкости, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Особенностью метода является то, что при давлениях, характерных для аккумуляторных систем топливоподачи, генерировать волну, движущуюся с местной скоростью звука, удобнее не при повышении давления на входе в трубопровод, а при сбросе давления при открытии клапана (форсунки) на выходе из трубопровода. Возможность применения такого метода была подтверждена в работе [8] для изучения влияния давления и температуры на скорость звука, сжимаемость и плотность дизельных топлив и рапсового метилового эфира.

Схема экспериментальной установки для определения скорости звука, использованной в настоящем исследовании, показана на рис. 1.

Установка разработана на основе стенда КИТ CR-006 для испытаний электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливных систем. Стенд оснащен топливным насосом высокого давления 4 (Siemens VDO), позволяющим получать давление топлива свыше 150 МПа. В качестве гидроаккумулятора использована топливная рампа 059 130 089 АН со встроенным в нее датчиком давления 9. Манометр 7 для контроля давления в рампе имеет диапазон шкалы от 0 до 1600 кгс/см<sup>2</sup>, класс точности 1,6. Нагнетательным трубопроводом 10 служит трубка высокого давления длиной 1200 мм (ГОСТ 8734-75). На конце нагнетательного трубопровода установлена пьезоэлектрическая форсунка Bosch CRI3-16 (поз. 11 на рис. 1). Форсунка управляется модулятором сигналов 12, с помощью которого можно задавать количество, длительность впрысков и интервал между ними. В начале и в конце измерительного участка трубопровода длиной  $L=1240$  мм установлены пьезодатчики давления AVL 5QP6002. Чувствительность датчиков составляет 2,36 пКл/бар, нелинейность – менее 0,8 %, собственная частота – 220 кГц.

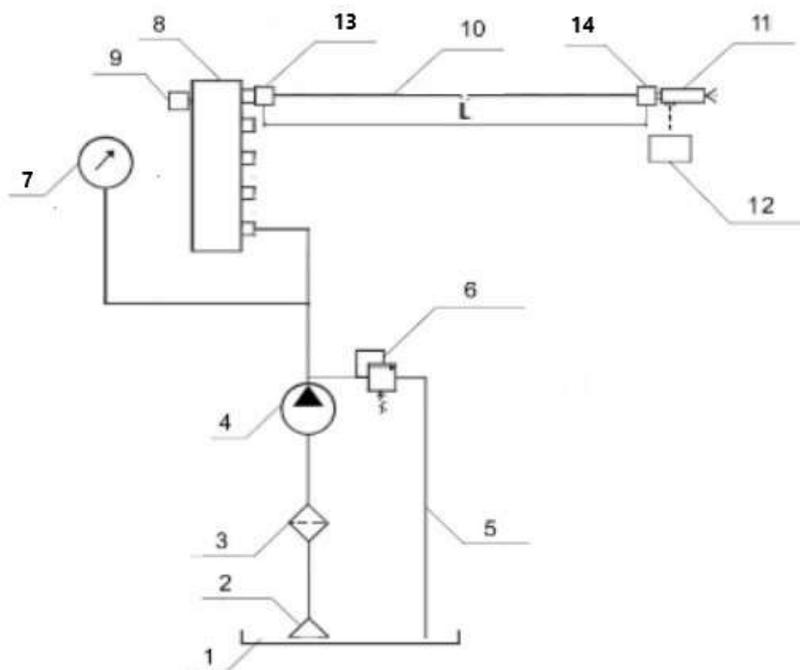


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментальной установки:

1 – емкость с топливом; 2 – топливозаборник; 3 – фильтр; 4 – нагнетательная секция топливного насоса высокого давления; 5 – сливной трубопровод; 6 – регулятор давления; 7 – манометр; 8 – гидроаккумулятор (топливная рампа); 9 – датчик давления в рампе; 10 – нагнетательный трубопровод; 11 – форсунка; 12 – устройство управления форсункой; 13 – датчик давления на входе в измерительный участок трубопровода; 14 – датчик давления на выходе из измерительного участка трубопровода; L – длина измерительного участка трубопровода.

При регистрации сигналов, установленных в нагнетательном трубопроводе датчиков давления, использован усилитель заряда LCARD LE-41 с коэффициентом передачи 10 мВ/пКл, полосой пропускания от 0,3 Гц до 22 кГц. Регистрация и преобразование сигналов датчиков давления топлива осуществляется с помощью измерительной установки LCARD LTR-U-8-1 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LCARD LTR11. АЦП имеет 16 дифференциальных каналов с максимальной суммарной частотой дискретизации 400 кГц. Разрядность АЦП составляет 14 бит. Сохранение и обработка информации о сигналах датчиков давления топлива производится с помощью программного обеспечения ООО «ДиСофт» PowerGraph.

Для подтверждения работоспособности стенда и обоснованности методики измерений была определена сжимаемость дизельного топлива плотностью  $835 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $310 \text{ К}$ . Измерения скорости выполнены при избыточных давлениях топлива в рампе  $40, 60, 80, 100, 120$  и  $140 \text{ МПа}$ . При управлении форсункой были заданы длительность управляющего импульса  $0,5 \text{ мс}$  и интервал между импульсами  $0,5 \text{ с}$ . Регистрация сигналов датчиков давления для каждого уровня давления топлива в рампе проводилась при работе АЦП последовательно в двух режимах с частотой дискретизации на канал  $66,66 \text{ кГц}$  и  $133,33 \text{ кГц}$ , соответственно. Для регистрации и обработки принято  $20 \pm 3$  срабатываний форсунки на каждом уровне давления топлива в рампе и значении частоты дискретизации.

В результате выполненных экспериментов были получены значения скорости  $a$  распространения волны возмущения в пределах измерительного участка нагнетательного трубопровода:

$$a = \frac{L}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $L$  – расстояние между датчиками измерительном участке трубопровода,  $\Delta t$  – интервал времени между сигналами датчиков.

Коэффициент сжимаемости  $\beta$  вычисляли с учетом деформации трубопровода по формуле, предложенной профессором И.В. Астаховым [6]:

$$\beta = -\frac{1 + p_H k}{2p_H} + \sqrt{\left(\frac{1 + p_H k}{2p_H}\right)^2 + \frac{1}{a^2 \rho_0 p_H} - \frac{k}{p_H}}, \quad (\text{Па}^{-1}), \quad (5)$$

где  $p_H$  – давление топлива в начале сжатия, Па;  $a$  – скорость звука в топливе, м/с;  $\rho_0$  – плотность топлива при атмосферных условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k$  – поправка Ротрока.

$$k = \frac{2}{E} \left( \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right) \quad (6)$$

$E$  – модуль упругости материала трубопровода, МПа;  $R$  – наружный диаметр

трубопровода, м;  $r$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Полученные после обработки данных результаты определения скорости звука в топливе  $a$  и коэффициента сжимаемости  $\beta$  представлены на рисунках 2 и 3. Точками показаны результаты, полученные в каждом опыте при открытии форсунки, штриховыми линиями показаны полиномиальные линии тренда 2-й степени, полученные средствами Microsoft Excel. С целью оценки влияния частоты дискретизации сигнала датчиков на точность результатов были вычислены дисперсия  $S^2$  значений коэффициента сжимаемости, полученных при частотах дискретизации сигнала 66,66 и 133,33 кГц. Зависимости дисперсии от давления в аккумуляторе для двух указанных частот дискретизации показаны на рис. 4.

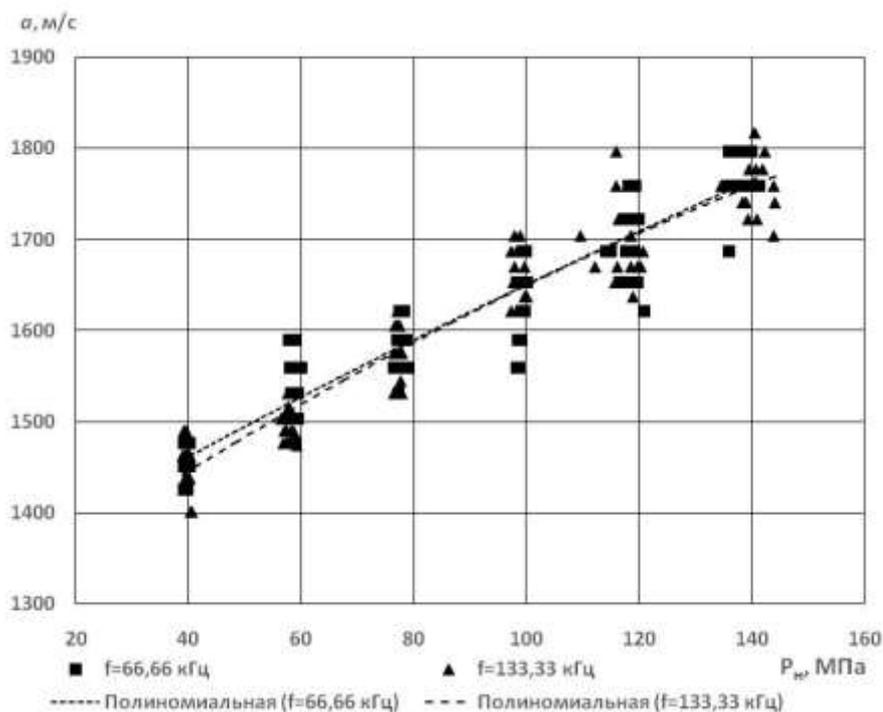


Рис. 2. Зависимость скорости звука в топливе  $a$  от давления в рампе  $p_n$  в момент начала возникновения волны возмущения при частотах сигнала АЦП  $f = 66,66 \text{ кГц}$  и  $133,33 \text{ кГц}$ .

## Выводы

Сравнение полученных значений сжимаемости с известными данными, полученными авторами ранее другим методом [5], а также полученными другими исследователями [6, 7, 8] показывает их хорошее соответствие (рис. 5), что подтверждает возможность определения коэффициента сжимаемости по скорости распространения волны понижения давления в трубопроводах систем топливоподачи аккумуляторного типа.

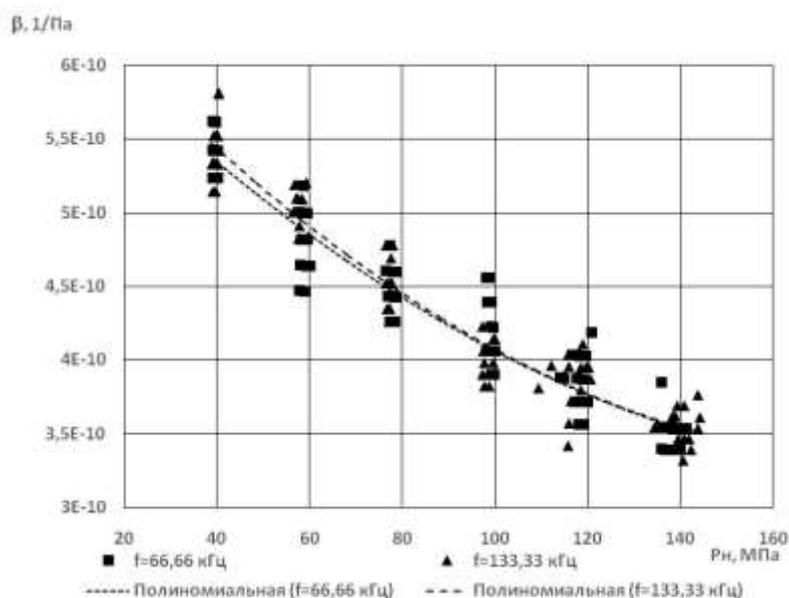


Рис. 3. Зависимость коэффициента сжимаемости топлив  $\beta$  от давления в рампе  $p_n$  в момент начала возникновения волны возмущения при частотах сигнала АЦП  $f = 66,66$  кГц и  $133,33$  кГц

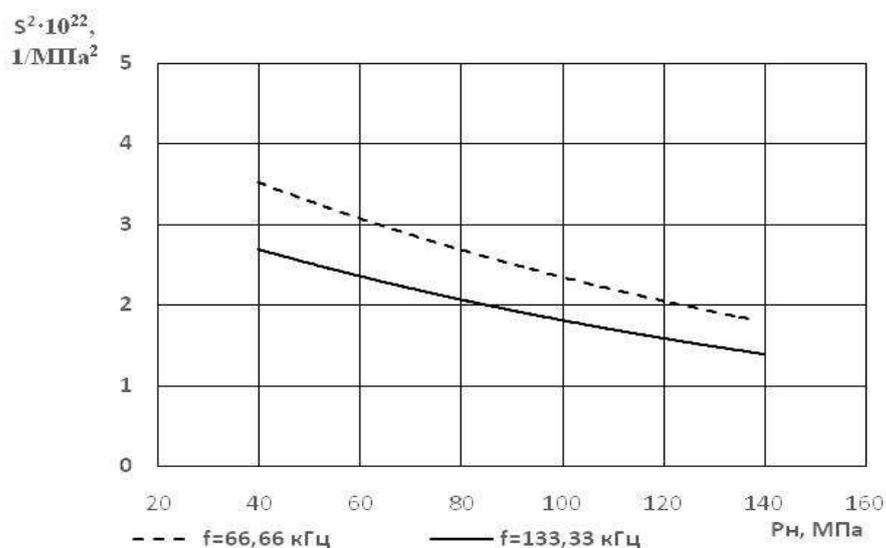


Рис. 4. Дисперсия  $S^2$  значений коэффициента сжимаемости

При определении скорости распространения волны падения давления в трубопроводе разброс получаемых значений относительно среднего с ростом начального давления в рампе уменьшается. Увеличение частоты дискретизации сигнала также приводит к снижению величины дисперсии.

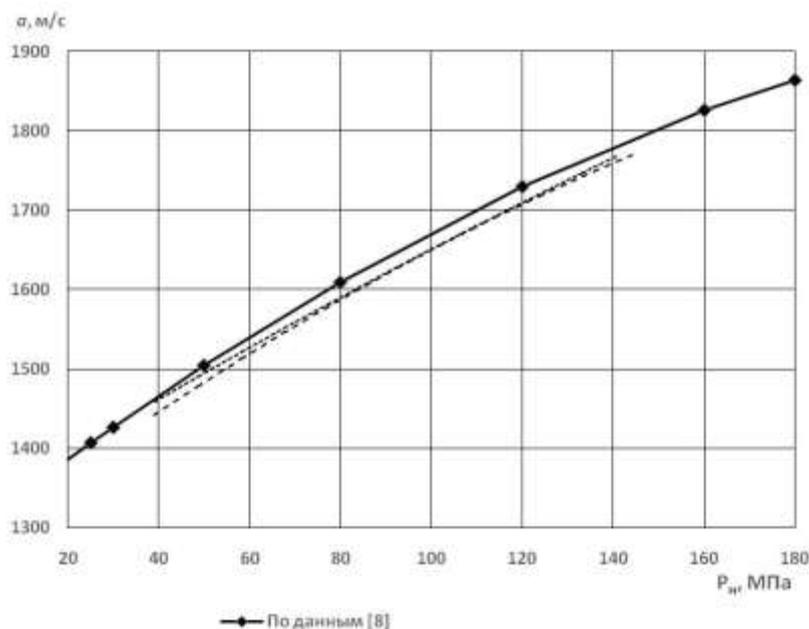


Рис. 5. Сравнение полученной скорости звука в топливе  $a$  с данными исследования [10]

Точность метода повышается с ростом давления в трубопроводе в момент возникновения волн возмущений, а также при более высокой частоте дискретизации сигнала АЦП, передающего информацию с датчиков давления в трубопроводе.

Этот метод может использоваться также для определения упругих свойств альтернативных видов топлива и их смесей с дизельным топливом.

### Список источников

1. Кулешов, А. С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", 2000. – 64 с. – ISBN 5-7038-1452-9. – EDN YOHPV.

2. Грехов, Л. В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей / Л. В. Грехов, И. И. Габитов, А. В. Неговора. – Москва : Легион-Автodata, 2013. – 292 с. – ISBN 978-5-88850-582-3. – EDN RLFBIH.
3. Расчет и корректировка значений упругих свойств топливных смесей / Л. В. Грехов, Н. А. Арсенов, Е. А. Салыкин, Ц. Чжао // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 5(758). – С. 74-89. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-74-89. – EDN MAXNFJ.
4. Астахов, И. В. Сжимаемость моторных топлив / И. В. Астахов // Энергомашиностроение. – 1960. – № 9. – С. 8-11.
5. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом / Э. Ч. Кадиата, В. М. Славущий, А. В. Курапин, Е. А. Салыкин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10(141). – С. 178-188. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-10-178-188. – EDN VLJMIR.
6. Определение констант уравнения состояния для расчета упругих свойств различных моторных топлив и технических жидкостей / Л. В. Грехов, В. А. Марков, Н. А. Арсенов [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2022. – № 4(143). – С. 108-137. – DOI 10.18698/0236-3941-2022-4-108-137. – EDN MLWTBG.
7. An on-line measurement method of injection rate of high pressure common rail system / Quan Dong, Xiyu Yang, Hao Ni, Jingdong Song, Changhao Lu, Zuo Ni // Measurement. – 2021. – Vol. 170. – DOI 10.1016/j.measurement.2020.108716.
8. The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels / R. Payri, F.J. Salvador, J. Gimeno, G. Bracho // Fuel. – Vol. – 90, Issue 3. – 2011. – P. 1172-1180. – DOI 10.1016/j.fuel.2010.11.015.

### References

1. Kuleshov A.S., Grehov L.V. *Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternaja optimizacija toplivopodachi i rabochih processov dvigatelej vnutrennego sgoranija*. (Mathematical modeling and computer optimization of fuel supply and working processes of internal combustion engines), Moscow, MGTU, 2000, 64 p.
2. Grehov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. *Konstrukcija, raschet i tehniceskij servis toplivopodajushhijh system dizelej* (Design, calculation and maintenance of diesel fuel supply systems), Moscow, Legion-Avtodata, 2013, 292 p.
3. Grehov L. V., Markov V. A., Arsenov N. A., Chzhao C. *Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2022, no. 7 (748), pp. 49-67.
4. Astahov I.V. *Jenergomashinostroenie*, 1960, no. 9, pp. 8-11.
5. Kadiata Je.Ch., Slavuckij V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 10 (141), pp. 178-188.

6. Grehov L.V., Markov V.A., Arsenov N.A., Chzhao C., Sa B. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Serija Mashinostroenie*, 2022, no. 4 (143), pp. 108-137.
7. Quan Dong, Xiyu Yang, Hao Ni, Jingdong Song, Changhao Lu, Zuo Ni *Measurement*, vol. 170, 2021, DOI 10.1016/j.measurement.2020.108716.
8. R. Payri, F.J. Salvador, J. Gimeno, G. Bracho *Fuel*, vol. 90, Issue 3, 2011, pp. 1172-1180, DOI 10.1016/j.fuel.2010.11.015.

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 Dmitriy N.**, senior lecturer, VSTU.  
**Kurapin Alexey V.**, Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, VSTU.  
**Salykin Evgeniy A.**, Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, VSTU.  
**Fedyanov Evgeniy A.**, Doctor of Sciences (Technical), professor, VSTU.

*Статья поступила в редакцию 15.02.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.*

*The article was submitted 15.02.2025; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 25.06.2026.*