

Научная статья
УДК 621.433

Совершенствование метода исследования рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр

Ян Сергеевич Цапурин ¹, Петров Андрей Михайлович ²,
Дмитрий Сергеевич Конюшков ³, Андрей Юрьевич Дунин ⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ tsapurin.yan@yandex.ru

² psiholiric@inbox.ru

³ konyushkov-d.s@yandex.ru

⁴ a.u.dunin@yandex.ru

Аннотация. В статье проведено исследование актуальности применения моделирования рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. Цель работы – совершенствование метода исследования рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. Проведены экспериментальные исследования с применением программно-расчётного комплекса для верификации моделей и получения зависимостей. Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало хороший уровень сходимости модели с экспериментом, что подтверждает точность модели и полученных зависимостей.

Ключевые слова: непосредственное впрыскивание бензина в цилиндр, метод исследования рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания, двигатель с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр

Для цитирования: Цапурин Я. С., Петров А. М., Конюшков Д. М., Дунин А. Ю. Совершенствование метода исследования рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original Article

Improvement of the method for studying the working process of an engine with spark ignition and direct injection of gasoline into the cylinder

Yan S. Tsapurin ¹, Andrey M. Petrov ², Dmitriy S. Konyushkov ³, Andrey U. Dunin ⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ tsapurin.yan@yandex.ru

² psiholiric@inbox.ru

³ konyushkov-d.s@yandex.ru

⁴ a.u.dunin@yandex.ru

© Цапурин Я.С., Петров А.М., Конюшков Д.М., Дунин А.Ю., 2026

№ 2 (48)
июнь 2026

Abstract. The article examines the relevance of using modeling of the working process of an engine with spark ignition and direct injection of gasoline into the cylinder. The purpose of this work is to improve the method for studying the working process of an engine with spark ignition and direct injection of gasoline into the cylinder. Experimental studies were conducted using a software and computational complex to verify models and obtain dependencies. A comparison of experimental data and calculations showed a good level of convergence between the model and the experiment, which confirms the accuracy of the model and the obtained dependencies.

Keywords: direct injection of gasoline into the cylinder, method of studying the internal combustion engine working process, spark-ignition engine with direct injection of gasoline into the cylinder

For citation: Tsapurin Y.S., Petrov A.M., Konyushkov D.S., Dunin A. U. Improvement of the method for studying the working process of an engine with spark ignition and direct injection of gasoline into the cylinder. // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 2 (48).

Введение

Система непосредственного впрыскивания бензина на сегодняшний день является одной из актуальных технологий топливоподачи в двигателях с искровым зажиганием (ДсИЗ). Исследования рабочего процесса двигателя могут позволить в дальнейшем добиться понижения расхода топлива и снижения вредных выбросов, что является необходимым для соблюдения современных экологических норм [7]. Однако такая система требует выбора давления впрыскивания, числа впрыскиваний и угла опережения впрыскивания. Поскольку двигатель является многорежимным объектом, для каждого из режимов работы требуется оптимизация параметров. Отсюда следует, что на первичной стадии исследования необходимо провести моделирование рабочего процесса, что требует уточнения уже существующей расчетной модели, разработанной на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) [4].

Материалы и методы исследования

В настоящее время разработка новых и совершенствование выпускающихся ДВС не представляется возможной без проведения расчетных исследований. Особую актуальность математическое моделирование и

компьютерная оптимизация ДВС приобретают в условиях ужесточения нормативов на вредные выбросы с ОГ, требованиями высокой удельной мощности и экономичности, когда объем и стоимость экспериментальных работ возрастают. Ведущими научными центрами проводятся широкомасштабные исследовательские работы по оптимизации рабочих процессов двигателей, включая алгоритмы управления топливной аппаратурой дизелей, которые удовлетворили бы установленные законодательством нормативы вредных выбросов [5]. Для первичной оценки рабочего процесса необходимы «простые» полуэмпирические формулы, базирующиеся на законах физики и химии. Данные модели успешно применяют при исследовании процесса сгорания, однако перед этим требуется их верификация, т.е. «качественная» обработка экспериментальных данных, и уточнение ряда эмпирических коэффициентов, которые в дальнейшем могут лечь в основу более точных методов расчета рабочего процесса, близких по эффективности к методам вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) [3].

Целью данной работы является усовершенствование подхода к моделированию рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием и прямым впрыском топлива.

Был проведен эксперимент, в процессе которого автомобиль Volkswagen Caddy с установленным на него комплексом «Сбор и обработка информации о ДВС МАДИ», двигался на разных частотах вращения двигателя и с разным углом открытия дросселя. В результате проведения эксперимента с применением программного интегрированного комплекса «Сбор и обработка информации о ДВС МАДИ» были получены показатели работы двигателя в составе транспортного средства в движении.

Для каждого режима был получен ряд данных: частота вращения, градус поворота коленчатого вала, управляющий импульс на форсунку, давление во впускном коллекторе, давление в топливной рампе, угол опережения

зажигания, а также положение дроссельной заслонки. Основопологающим является индицирование двигателя внутреннего сгорания, позволяющее определить, как протекает рабочий процесс в двигателе. Индикаторная диаграмма – кривая изменения давления в цилиндре на протяжении рабочего цикла, используется как одно из средств описания и анализа рабочего процесса [1]. Она представляет собой непосредственную запись давления, которую можно увидеть без дополнительных расчётов [8]. В основе работы системы индицирования находится датчик-свеча (рисунок 1), устанавливаемый непосредственно в цилиндр для снятия показаний давления с характеристиками, приведёнными в таблице 1.

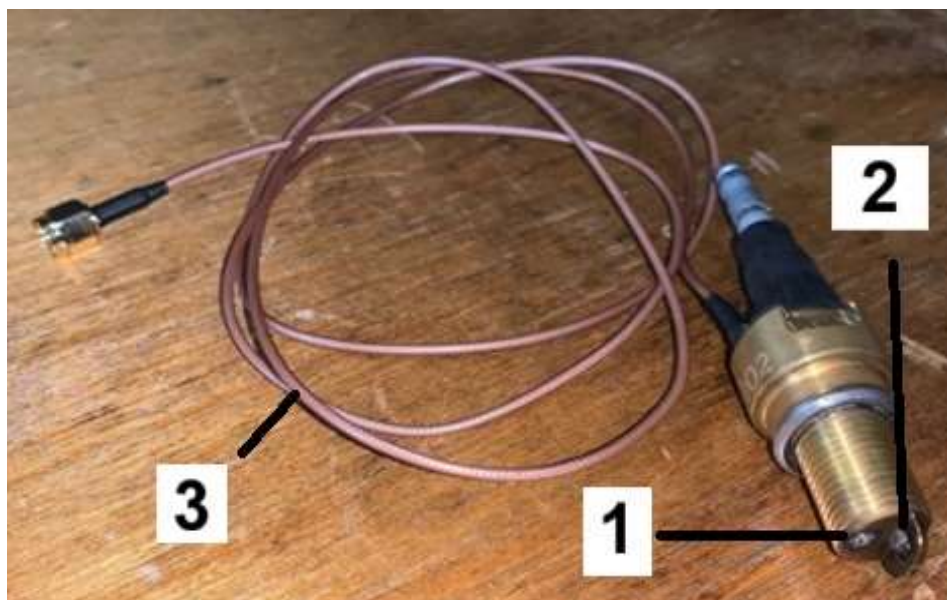


Рис. 1. Датчик-свеча.

1 – пьезоэлектрический датчик давления. 2 – электроды свечи зажигания.
3 – коаксиальный провод для подключения к комплексу

Таблица 1

Характеристики датчика-свечи

Чувствительность (определяется производителем индивидуально для каждого датчика при тарировке)	-2.3 пКл/0,1МПа
Предел измерения	20 МПа
Погрешность	2%
Предел по температуре (Температура головки блока цилиндров в окрестности свечи зажигания);	300 °С
Собственная частота механических колебаний	> 50 кГц;

В качестве объекта исследования был использован ДсИЗ 4СН7,1/7,56 (Volkswagen CBZA) со следующими характеристиками, приведенными в таблице 2 [9].

Таблица 2

Характеристики двигателя Volkswagen CBZA

1	Тип двигателя	Двигатель с искровым зажиганием, с турбонаддувом
2	Тип системы питания	Непосредственное впрыскивание бензина в цилиндр
3	Тип системы охлаждения	Жидкостная
5	Объем двигателя	1197 см ³
6	Диаметр цилиндра	71 мм
7	Ход поршня	75,6 мм
8	Число и расположение цилиндров	4Р
9	Номинальная мощность	$N_{e \text{ ном}} = 77 \text{ кВт}$
10	Номинальная частота вращения	$n_{\text{ном}} = 6000 \text{ мин}^{-1}$
11	Степень сжатия	$\varepsilon = 10$
12	Коэффициент избытка воздуха	$\alpha = 1$
13	Число клапанов на цилиндр	2
14	Ориентировочная литровая мощность	$N_{\text{л}} \approx 38,5 \text{ кВт/л}$

Методика регистрации показателей включает в себя следующие этапы.

1. На экспериментальный двигатель устанавливается комплекс с нужными для конкретного испытания набором датчиков. В данном случае происходила регистрация показаний с датчиков-свечей во всех цилиндрах и датчика положения коленчатого вала. При необходимости возможно подключение к диагностической системе автомобиля для получения данных непосредственно от блока управления, однако в более низкой частоте обновления.

2. Далее датчики подключаются в регистрационный комплекс через необходимые преобразователи. Датчик-свеча подключается через усилитель заряда для получения необходимого уровня сигнала.

3. Комплекс с датчиками в свою очередь подключается к компьютеру со специальным программным обеспечением, которое позволяет в режиме реального времени осуществлять запись всех подключенных датчиков и сохранять их показания в файл.

4. Производится окончательная настройка (установка связи и выбор нужных для записи параметров), в конце которой комплекс готов к регистрации показателей двигателя.

5. Полностью готовый к испытаниям автомобиль отправляется в тестовую поездку. В это время производится запись данных при движении автомобиля в разных режимах нагрузки.

6. Записанные данные преобразуются в удобный для дальнейшей работы вид.

7. Производится анализ полученных данных, позволяющий выявить необходимые характеристики рабочего процесса двигателя.

Результаты исследования и их обсуждение

После проведения эксперимента и обработки результатов был выведен ряд диаграмм для двух режимов работы двигателя – частичной и полной нагрузки. В основе каждого из графиков лежит индикаторная диаграмма, полученная в режиме «прокрутки» для возможности точного определения положения верхней мёртвой точки (ВМТ) относительно угла поворота коленчатого вала (ПКВ), так как изначально эти данные не синхронизированы, что требует осуществления их привязки. Эти данные включали информацию о давлении в цилиндре в разные моменты поворота коленчатого вала. Они позволили определить тот момент, когда давление в цилиндре достигает наивысшего значения, и этот момент был связан с положением ВМТ [2]. Таким образом, зная, что при сжатии пик давления достигается в ВМТ, шкала

градусов поворота коленчатого вала была выставлена так, чтобы пик давления находился в 360° ПКВ. Далее по линии сжатия накладывается диаграмма, полученная во время проведения эксперимента. Очень важно точно соотнести линии сжатия для возможности определения начала процесса сгорания [6]. Началом процесса сгорания считается момент отрыва линии давления выше от линии сжатия, полученной при прокрутке. После этого на график наносится третья линия давления, полученная с использованием расчётной модели и уточнения её коэффициентов (рисунки 2, 3).

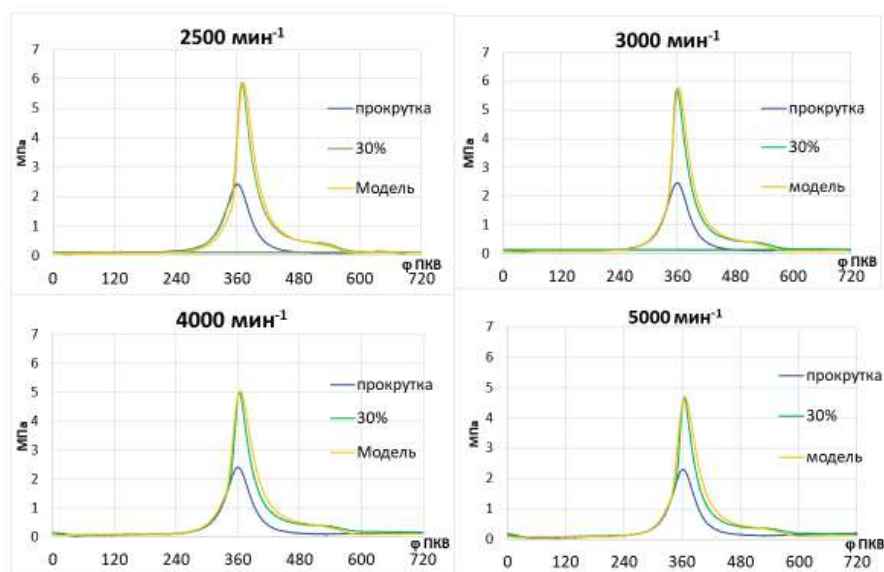


Рис. 2. Индикаторные диаграммы частичной нагрузки, 30% открытия дроссельной заслонки

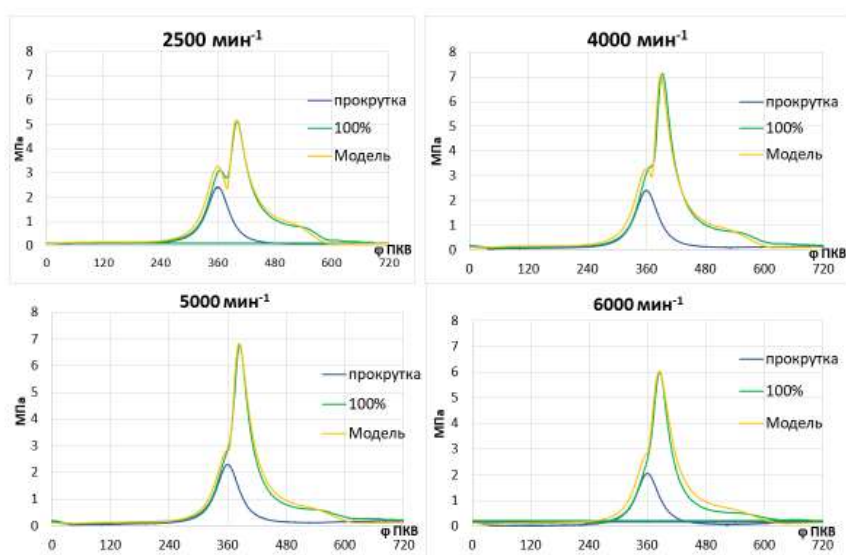


Рис. 3. Индикаторные диаграммы полной нагрузки, 100% открытия дроссельной заслонки

Зная точное положение пика давления, а также значение угла опережения зажигания для каждого из режимов, авторы рассчитали задержку воспламенения для режимов частичной и полной нагрузки (30% и 100% угла открытия дроссельной заслонки). Далее были выведены зависимости задержки воспламенения в экспоненциальном виде, так как это позволяет осуществлять экстраполяции линии без опасности возникновения экстремумов (рисунок 4).

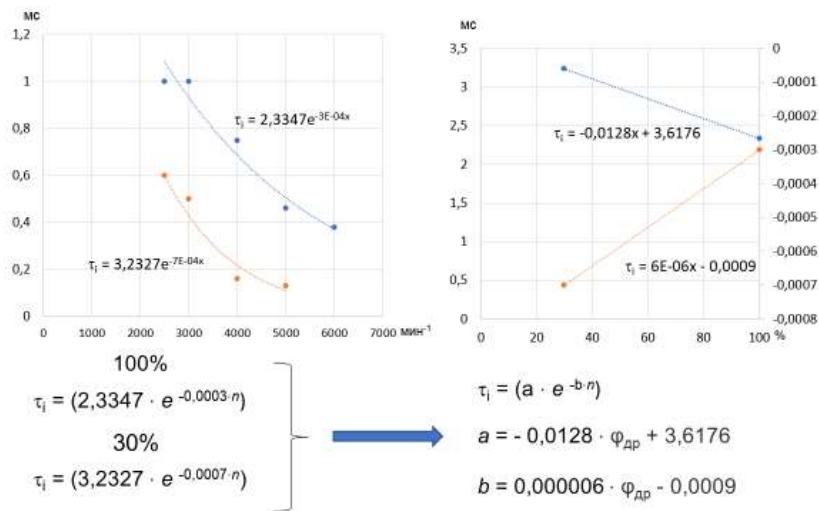


Рис. 4. Зависимости задержки воспламенения от режима работы двигателя

Экспериментальные данные позволили определить длительности тепловыделения на разных режимах работы с целью выведения зависимостей для длительности тепловыделения (рисунок 5) [10].

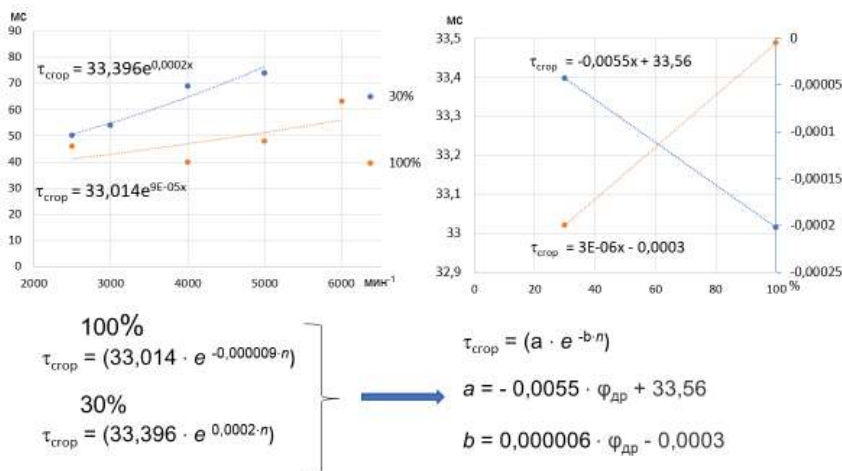


Рис. 5. Зависимости длительности тепловыделения от режима работы двигателя

Полученные данные для построения зависимостей весьма ограничены, что требует дальнейшей их корректировки с применением большего количества экспериментальных данных в составе транспортного средства и режимов работы разных нагрузок и частоты вращения для более точного расчёта зависимостей и возможности их верификации.

Выводы

Предложен усовершенствованный метод расчетно-экспериментального исследования рабочего процесса ДсИЗ с непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. Для исследования однофакторного влияния режимных и конструктивных параметров ДсИЗ на рабочий процесс использовали 0-мерную математическую модель рабочего процесса ДсИЗ. Верификация модели осуществлялась с применением интегрированного комплекса «Сбор и обработка информации о ДВС МАДИ». Полученные экспериментальные данные в математической модели рабочего процесса ДсИЗ позволили учесть зависимость задержки воспламенения и длительности тепловыделения от режима работы двигателя с непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр. На режиме полной нагрузки ошибка определения максимального давления цикла составила – 3,4%, а угла его достижения – 4,1% относительно экспериментальных данных.

Список источников

1. Двигатели внутреннего сгорания : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» направления подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»: в 3 книгах / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]. Том Книга 1. – Издание 4-е, исправленное. – Москва : Издательство «Высшая Школа», 2010. – 479 с. – ISBN 978-5-06-006200-7. – EDN QMKJWF.
2. Peng, Q. The impact of fuel and injection strategy on combustion characteristics, emissions and efficiency in gasoline compression ignition operation / Q. Peng, T. Rockstroh, C. Hall // Fuel. – 2022. – Vol. 318. – P. 123548. – DOI 10.1016/j.fuel.2022.123548. – EDN SKMOFA.
3. Krishnamoorthi, M. Effect of fuel injection strategies on combustion and cyclic variations in a medium-duty gasoline compression ignition engine / M. Krishnamoorthi, H. Singh,

A. K. Agarwal // *Fuel*. – 2025. – Vol. 389. – P. 134392. – DOI 10.1016/j.fuel.2025.134392. – EDN FPZDVY.

4. Автомобильные двигатели : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (автомобильный транспорт)» направления подготовки «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования» / М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев [и др.]. – 2-е издание, исправленное. – Москва : Академия, 2011. – 464 с. – ISBN 978-5-7695-8456-5. – EDN QNXSSB.

5. Optimization study on fuel injection characteristics of gasoline direct injection (GDI) engine fuel system / Y. Wang, J. Tian, Y. Xiong [et al.] // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381. – P. 133468. – DOI 10.1016/j.fuel.2024.133468. – EDN XEERCD.

6. Болотов, П. О. Расчетно-экспериментальное определение параметров тепловыделения в цилиндре двигателя с искровым зажиганием / П. О. Болотов // Политехнический молодежный журнал. – 2018. – № 9(26). – С. 12. – DOI 10.18698/2541-8009-2018-9-381. – EDN YIZUTZ.

7. Козлов, А. В. Экспериментальное исследование снижения нормируемых вредных выбросов с отработавшими газами наддувных бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива / А. В. Козлов, А. В. Гонтюрев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 2(36). – EDN DNCYJM.

8. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием / А. В. Капустин, В. Л. Чумаков, С. Н. Девянин, Б. А. Жоробеков // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 43-51. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-43-51. – EDN QPGNSQ.

9. Gasoline direct injection engines – A review of latest technologies and trends. Part 1: Spray breakup process / F. Duronio, A. De Vita, L. Allocca, M. Anatone // *Fuel*. – 2020. – Vol. 265. – P. 116948. – DOI 10.1016/j.fuel.2019.116948. – EDN APASUJ.

10. Барченко, Ф. Б. Расчет рабочего процесса искрового свободнопоршневого двигателя двойного действия / Ф. Б. Барченко, И. И. Захаров // Двигателестроение. – 2023. – № 3(293). – С. 3-14. – DOI 10.18698/jec.2023.3.3-14. – EDN UBOVCY.

References

1. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiyani A.S., Alexeev I.V., Golubkov L.N., Chernyak B.Ya., Trusov V.I., Kamfer G.M., Makhov V.Z., Prshvin S.A., Sinyavsky V.V., Matyukhin L.M., Nazarov N.I., Shatrov M.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* (Internal Combustion Engines), Moscow, Izdatel'stvo "Vysshaya Shkola", 2010, 479 p., ISBN 978-5-06-006200-7.

2. Peng Q., Rockstroh T., Hall C. The impact of fuel and injection strategy on combustion characteristics, emissions and efficiency in gasoline compression ignition operation, *Fuel*, 2022, vol. 318, p. 123548, doi 10.1016/j.fuel.2022.123548.

3. Krishnamoorthi, M., Singh H., Agarwal A.K. Effect of fuel injection strategies on combustion and cyclic variations in a medium-duty gasoline compression ignition engine, *Fuel*, 2025, vol. 389, p. 134392, doi 10.1016/j.fuel.2025.134392.
4. Shatrov M.G., Morozov K.A., Alexeev I.V., Khachiyan A.S., Prishvin S.A., Golubkov L.N., Gorshkov Yu.V., Chernyak B.Ya., Sinyavsky V.V., Bogdanov S.N. *Avtomobil'nyye dvigateli* (Automobile engines), Moscow, Akademiya, 2011, 464 p., ISBN 978-5-7695-8456-5.
5. Wang Y., Tian J., Xiong Y., Wang Lu., Ji Sh., Cheng Y. Optimization study on fuel injection characteristics of gasoline direct injection (GDI) engine fuel system, *Fuel*, 2025, vol. 381, p. 133468, doi 10.1016/j.fuel.2024.133468.
6. Bolotov P.O. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2018, no. 9(26), p. 12, doi 10.18698/2541-8009-2018-9-381.
7. Kozlov A.V., Gontyurev A.V. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 2(36).
8. Kapustin A.V., Chumakov V.L., Devyanin S.N., Zhorobekov B.A. *Agroinzheneriya*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 43-51, doi 10.26897/2687-1149-2023-4-43-51.
9. Duronio F., De Vita A., Allocca L., Anatone M. Gasoline direct injection engines – A review of latest technologies and trends. Part 1: Spray breakup process, *Fuel*, 2020, vol. 265, p. 116948, doi 10.1016/j.fuel.2019.116948.
10. Barchenko F.B., Zakharov I.I. *Dvigatestroyeniye*, 2023, no. 3(293), pp. 3-14, doi 10.18698/jec.2023.3.3-14.

Рецензент: Г. Г. Тер-Мкртчян, д-р техн. наук, доцент, МАДИ

Информация об авторах

Цапурин Я. С. – студент, МАДИ, Москва;

Петров А. М. – аспирант, МАДИ, Москва;

Конюшков Д. С. – аспирант, МАДИ, Москва;

Дунин А. Ю. – д-р. техн. наук, доцент, МАДИ, Москва.

Information about the authors

Tsapurin Ya. S. – student, MADI, Moscow;

Petrov A. M. – Postgraduate student, MADI, Moscow;

Konyushkov D. S. – Postgraduate student, MADI, Moscow;

Dunin A. U. – Doctor of Sciences (Technical), associate professor, MADI, Moscow.

Статья поступила в редакцию 20.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 07.04.2026.

The article was submitted 20.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; accepted for publication 07.04.2026.