

Научная статья
УДК 621.433.2

Сравнение показателей газового двигателя с различным фазированием подачи газа

Дмитрий Николаевич Илюшин¹, Роман Андреевич Темин²,
Евгений Александрович Салыкин³, Евгений Алексеевич Федянов⁴

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

¹ilyushin@vstu.ru

²romantemin@mail.ru

³e_salykin@vstu.ru

⁴fedyanov@vstu.ru

Аннотация. Приведены результаты сравнительных испытаний двигателя с искровым зажиганием при подаче природного газа непосредственно в цилиндр в различные фазы рабочего цикла: на такте впуска и на такте сжатия. Сравнение проведено по величине индикаторной работы цикла, значения которой определены обработкой индикаторных диаграмм, снятых в процессе испытаний. Дано описание испытательного стенда и использованного измерительного оборудования. Установлено, что в исследованном диапазоне частичных нагрузок подача газа в цилиндр на такте сжатия позволяет увеличить индикаторную работу цикла на 5-7%. Отмечено, что при подаче газа на такте впуска наполнение цилиндров воздухом ниже, чем при том же положении дроссельной заслонки и подаче газа на такте сжатия. Показано, что отмеченное уменьшение расхода воздуха обусловлено снижением разрежения в цилиндре вследствие подачи в его объем природного газа через форсунку. Обосновано предположение о том, что наблюдаемая более высокая скорость сгорания при подаче газа на такте сжатия обусловлена влиянием струи газа, подаваемого на такте сжатия, на параметры турбулентности в камере сгорания.

Ключевые слова: газовый двигатель, подача газа, мощность газового двигателя, непосредственная подача природного газа, индикаторная диаграмма

Для цитирования: Илюшин Д.Н., Темин Р.А., Салыкин Е.А., Федянов Е.А. Сравнение показателей газового двигателя с различным фазированием подачи газа // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

Comparison of gas engine performance with different gas supply methods

Dmitriy N. Ilyushin ¹, Roman A. Temin ², Evgeniy A. Salykin ³, Evgeniy A. Fedyanov ⁴

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

¹ilyushin@vstu.ru

²romantemin@mail.ru

³e_salykin@vstu.ru

⁴fedyanov@vstu.ru

Abstract. The results of comparative tests of a spark-ignition engine are presented, in which natural gas was injected directly into the cylinder during different phases of the power cycle: during the intake stroke and, in the second case, during the compression stroke. The comparison was based on the cycle work, the values of which were determined by analyzing the indicator diagrams recorded during the tests. A description of the test bench and the measuring equipment used is provided. It was found that, within the investigated range of partial loads, supplying gas to the cylinder during the compression stroke allows the cycle indicator work to be increased by 5–7%. It is noted that when gas is supplied during the intake stroke, the air filling of the cylinders is lower than at the same throttle valve position and gas supply during the compression stroke. It is shown that the observed decrease in air flow is due to a reduction in cylinder vacuum resulting from the supply of natural gas into the cylinder volume through the injector. The assumption that the observed higher combustion rate during gas injection in the compression stroke is due to the influence of the gas jet injected during the compression stroke on the turbulence parameters in the combustion chamber is substantiated.

Keywords: gas engine, gas supply, gas engine power, natural gas direct injection, indicator diagram

For citation: Ilyushin D.N., Temin R.A., Salykin E.A., Fedyanov E.A. Comparison of gas engine performance with different gas supply methods. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 2 (48).

Введение

В России доля автомобилей, работающих на компримированном природном газе (КПГ), в последние годы устойчиво растет. Так, согласно опубликованным данным [1], в период с 2018 г. по настоящее время ежегодный прирост числа таких автомобилей составлял более 7%.

Значительная часть двигателей, работающих на сжатом природном газе, это переоборудованные бензиновые двигатели. При таком переоборудовании способом подачи газа, не требующим изменений в конструкции основных деталей двигателя, является подача газа во впускной коллектор. В этом случае перевод бензинового двигателя на питание природным газом приводит к снижению номинальной мощности на 12-20%, что обусловлено, с одной стороны, меньшей, чем у паров бензина, плотностью основного компонента природного газа – метана, а с другой, большим значением количества воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания метана [2–6]. Расчеты показывают, что при прочих одинаковых условиях теплота сгорания топливовоздушного заряда в цилиндре двигателя, работающего на природном газе с его подачей во впускной трубопровод, на 10,5% меньше, чем в двигателе, работающем на бензине [7].

Снижения мощности при переводе бензинового двигателя на природный газ можно в значительной мере избежать, подавая газ под давлением непосредственно в цилиндр на такте сжатия [8–11].

Цель исследования – дать количественную оценку повышению индикаторной мощности двигателя при подаче газа непосредственно в цилиндр на такте сжатия по сравнению с его подачей на впуске. Особенностью выполненного исследования является то, что подача газа на такте впуска осуществлялась так же, как и на такте сжатия, непосредственно в пространство цилиндра, а не во впускной трубопровод.

Испытательное оборудование и методика проведения эксперимента

Для количественной оценки влияния способа подачи природного газа на развиваемую мощность проведены испытания работавшего на природном газе двигателя мобильной электрогенераторной установки ГАБ-4М.

Двигатель УД-25 электрогенераторной установки – бензиновый четырехтактный двухцилиндровый воздушного охлаждения с рабочим

объемом 0,49 дм³. Номинальная мощность при работе на бензине 10 л. с. (8,36 кВт) при 3000 об/мин.

При переоборудовании двигателя на питание природным газом степень сжатия изменением объема камеры в поршне повышена с 6 до 10,2. Для подачи газа в головке блока цилиндров установлены электромагнитные форсунки, обеспечивающие требуемую подачу газа в пределах одного такта рабочего цикла двигателя. Штатная система зажигания заменена системой с электронным управлением на базе контроллера SPTronic M8L и индивидуальными катушками зажигания для каждого из цилиндров.

Для измерения расхода воздуха использован датчик массового расхода, установленный во впускном тракте на ресивере объемом 200 дм³, предназначенном для сглаживания пульсаций давления в потоке.

Испытания проведены для двух вариантов подачи газа. В первом газ поступал в цилиндр на такте впуска, а во втором – на такте сжатия после закрытия впускного клапана. При этом предполагалось, что первый вариант соответствует, в некоторой степени, подаче газа во впускной трубопровод.

Все опыты были проведены при частоте вращения коленчатого вала 3000 об/мин в диапазоне нагрузок, в котором КПД электрического генератора оставался неизменным [12]. С учетом последнего условия нагрузочный режим задавали долей вырабатываемой электрической мощности от ее номинального значения (6 кВт). Состав топливоздушнoй смеси во всех случаях поддерживался стехиометрическим.

Влияние способа подачи газа оценивали по величине индикаторной работы циклов, которую находили путем обработки полученных в ходе испытаний индикаторных диаграмм. Для индицирования использованы датчики-свечи фирмы Kistler модели 6118С с диапазоном измерения 0–200 бар, усилитель заряда для пьезоэлектрических датчиков 5064С в платформе обработки аналоговых сигналов SCP 2853BF21 и аналогово-цифровой преобразователь Zetlab ZET220. Сбор, накопление и

математическая обработка результатов измерений выполнялись в программном обеспечении ООО «ДИСофт» PowerGraph.

Цикловую подачу газа в ходе экспериментов изменяли, задавая длительность импульса управления клапаном форсунки. При этом особенностью управления подачей газа было фиксированное положение момента закрытия клапана форсунки по углу поворота вала двигателя относительно верхней мертвой точки (ВМТ). Во всех опытах клапан форсунки закрывался за 68 градусов поворота коленчатого вала (ПКВ) до ВМТ. Продолжительность подачи газа регулировалась изменением значения угла поворота коленчатого вала, соответствующего началу открытия форсунки.

Результаты эксперимента и их анализ

На рисунках 1, 2, 3 и 4 приведены индикаторные диаграммы, полученные для двух вариантов подачи газа при работе двигателя с различными частичными нагрузками. Во всех случаях величина нагрузки указана по ее значению, полученному при работе двигателя с подачей газа в цилиндр на такте сжатия.

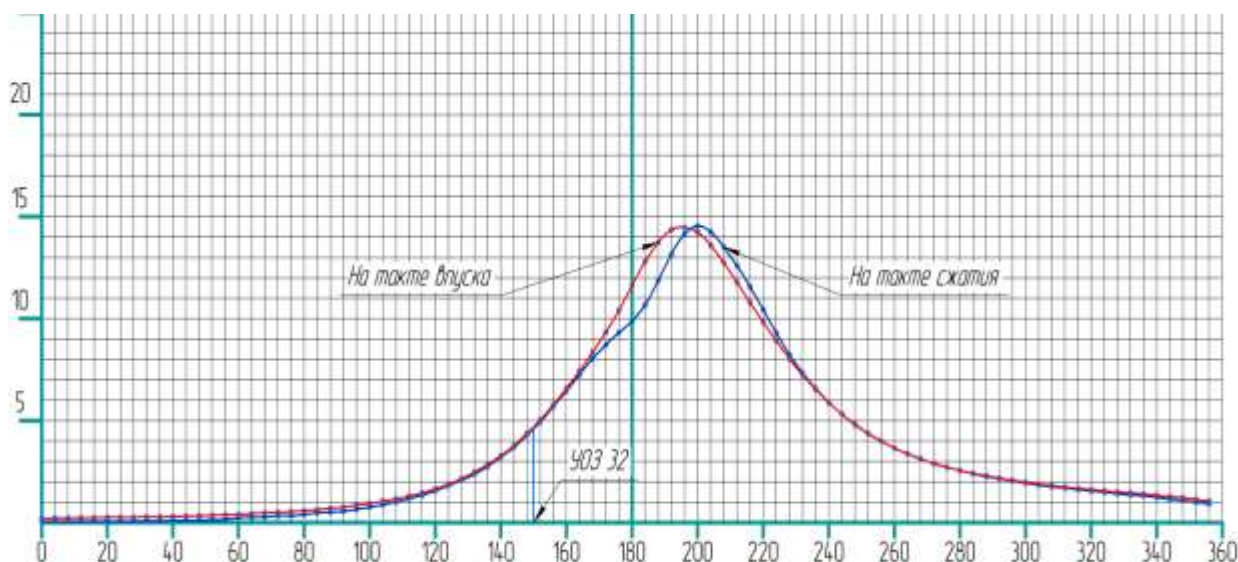


Рис. 1. Сравнение индикаторных диаграмм при нагрузке 15% от номинальной

При нагрузке, равной 15% от номинальной (рисунок 1), и одинаковых (32 градуса ПКВ до ВМТ) для двух вариантов подачи газа оптимальных значениях угла опережения зажигания (УОЗ) индикаторная работа цикла при

подаче газа на такте сжатия примерно на 5% выше. Вместе с тем максимальное давление цикла оказывается в обоих вариантах подачи газа примерно равным. С учетом последнего увеличение индикаторной работы в случае подачи газа в цилиндр на такте сжатия объясняется заметным повышением длительности периода индукции и соответствующим смещением основной фазы сгорания в зону рабочего хода поршня. Максимум давления в цикле с подачей газа на впуске достигается примерно на 4 градусах ПКВ ближе к ВМТ, чем в цикле с подачей газа на сжатии.

Повышение длительности периода индукции и смещение процесса сгорания на линию расширения связано, по нашему мнению, с тем, что на малой нагрузке диапазон углов поворота коленчатого вала, в пределах которого газ поступает в цилиндр, оказывается приближен к ВМТ. Следствием этого является некоторая неравномерность распределения газа по пространству цилиндра.

Испытания показали также, что подача природного газа на такте впуска приводит, по сравнению с подачей газа на сжатии, к падению разрежения за дроссельной заслонкой. На рассматриваемом режиме значения разрежения были 52 и 48 кПа, соответственно.

На рисунках 2, 3, 4 приведены индикаторные диаграммы, полученные при больших значениях нагрузки. На режиме работы с нагрузкой 27% (рисунок 2) переход от подачи газа на такте впуска к подаче на такте сжатия привел к повышению индикаторной работы цикла на 6,2%. При этом оптимальные УОЗ для обоих вариантов подачи газа оказались одинаковыми и равными 32 градусам ПКВ.

Расход воздуха при подаче газа на такте сжатия оказался на 6% больше, чем при подаче на впуске. Мы считаем, это связано с повышением давления в цилиндре вследствие подачи газа и, соответственно, уменьшением перепада давлений, под действием которого возникает поток воздуха во впускном тракте двигателя.

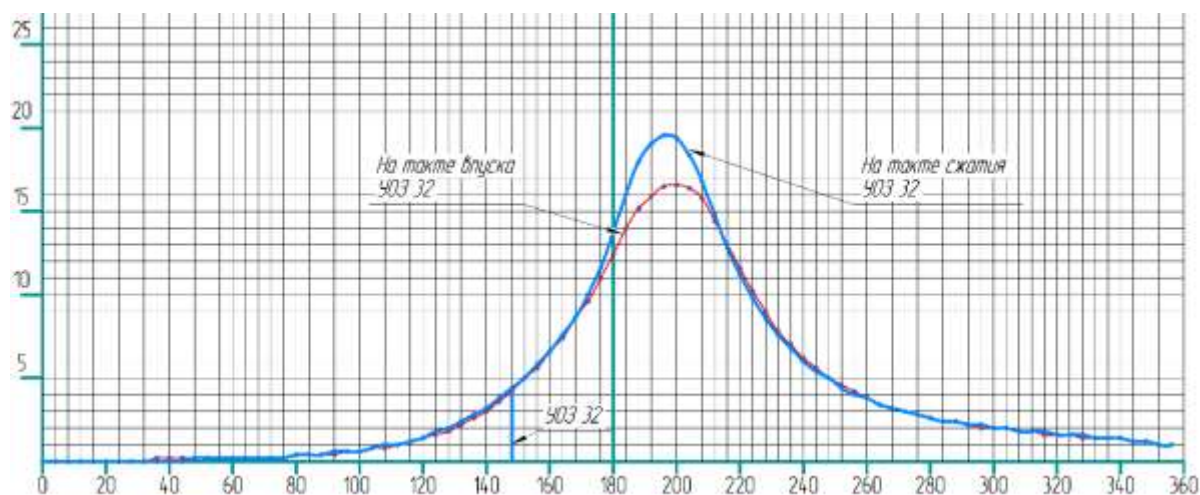


Рис. 2. Сравнение индикаторных диаграмм при нагрузке 27% от номинальной

На режиме с нагрузкой 39% от номинальной (рисунок 3) индикаторная работа цикла с подачей газа на такте сжатия выше на 7%. При этом оптимальные УОЗ для двух вариантов подачи газа оказались различными. В случае подачи газа на сжатии оптимальный УОЗ равен 27 градусам ПКВ, что на 5 градусов ПКВ меньше, чем при подаче газа на такте впуска.

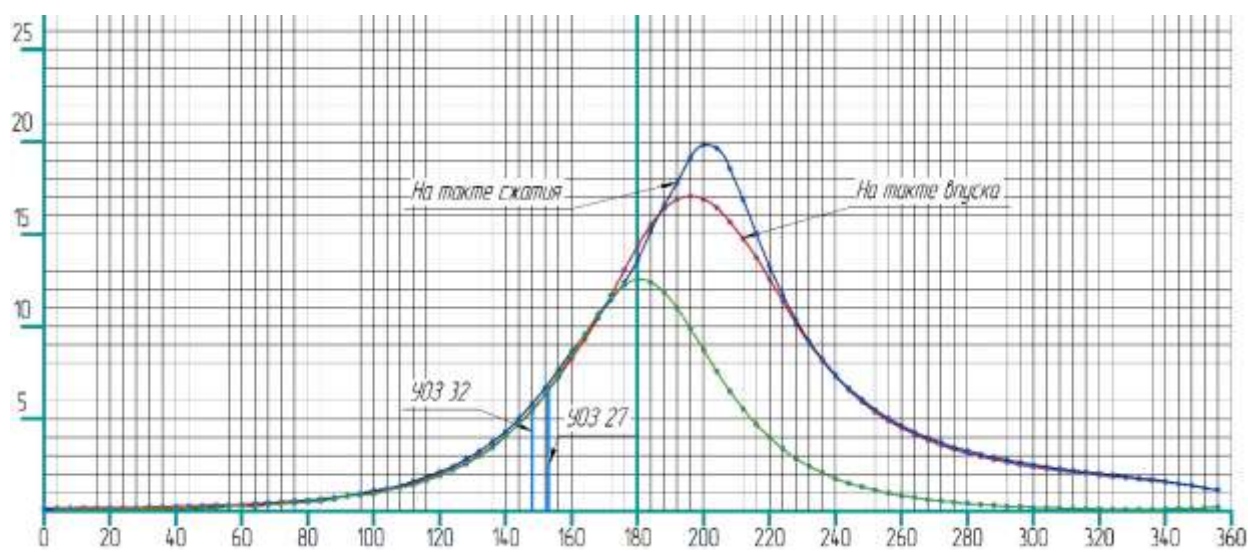


Рис. 3. Сравнение индикаторных диаграмм при нагрузке 39% от номинальной

На рисунке 4 приведены индикаторные диаграммы, полученные для двух вариантов подачи газа, при работе двигателя с нагрузкой 47%. Значения УОЗ для обоих вариантов подачи были установлены одинаковыми и равными 30 градусам ПКВ. При таких регулировках УОЗ подача газа в цилиндр на такте сжатия позволяет повысить индикаторную работу цикла на 5,3%.

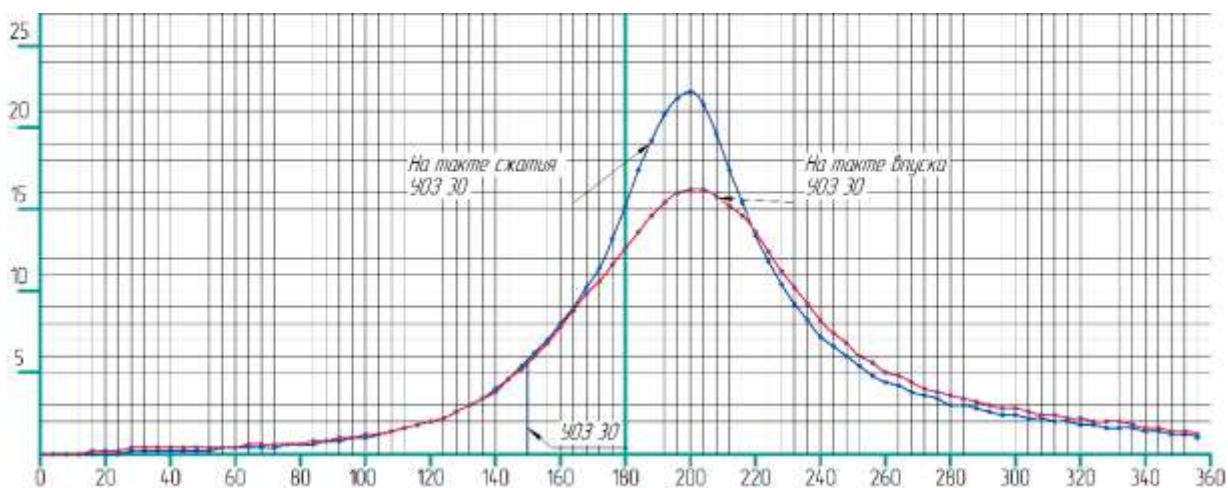


Рис. 4. Сравнение индикаторных диаграмм при нагрузке 47% от номинальной

Уменьшение прироста индикаторной работы на этом режиме обусловлено тем, что при принятом способе регулирования цикловой подачи газа форсунки открываются до начала собственно процесса сжатия, то есть до момента закрытия впускного клапана. Это обстоятельство ограничило диапазон нагрузок, в котором было проведено настоящее исследование.

Выводы

Приведенные выше результаты испытаний позволяют утверждать, что подача природного газа непосредственно в цилиндр двигателя на такте сжатия позволяет существенно повысить индикаторную работу и, соответственно, индикаторную мощность, по сравнению с вариантами подачи газа на впуске. При этом анализ индикаторных диаграмм на режимах с нагрузкой более 20% от номинальной, на которых были проведены испытания, свидетельствует о том, что непосредственная подача газа в цилиндр на такте сжатия приводит к повышению скорости сгорания топливовоздушной смеси. Причиной этого, по нашему мнению, является повышение интенсивности турбулентности топливовоздушного заряда вследствие ее генерации струей газа, подаваемого через форсунку.

Список источников

1. Перспективы газомоторного рынка России / Финансовый университет при правительстве Российской Федерации. – URL: https://www.fa.ru/university/structure/university/uso/press-service/press-releases/perspektivy-gazomotornogo-rynka-rossii?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 09.05.2026).

2. Анализ способов конвертации автомобильных дизелей на питание природным газом / М. Г. Шатров, А. С. Хачиян, В. В. Синявский, И. Г. Шишлов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 4(34). – С. 29-32. – EDN QZWFCT.
3. Шишков, В. А. Непосредственный впрыск газового топлива в камеру сгорания ДВС с искровым зажиганием / В. А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 6(18). – С. 51-57. – EDN MXHVFB.
4. Генкин, К.И. Газовые двигатели / К.И. Генкин. – Москва: Машиностроение, 1977. – 193с.
5. Natural Gas Engines: For Transportation and Power Generation / A. K. Agarwal, S. R. Krishnan, V. Mulone, ed. by K. K. Srinivasan. – Singapore : Springer Singapore, 2019. – 419 p. – ISBN 978-981-13-3307-1. – DOI 10.1007/978-981-13-3307-1.
6. Матюхин, Л. М. Влияние состава топлива и способа смесеобразования на показатели двигателя / Л. М. Матюхин // Труды НАМИ. – 2024. – № 4(299). – С. 36-44. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-4-36-44. – EDN ECQMYP.
7. Дубовкин, Н. Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н. Ф. Дубовкин. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
8. A comparative study of directly injected, spark ignition engine performance and emissions with natural gas, gasoline and charge dilution / T. Kar, Zh. Zhou, M. Brear [et al.] // Fuel. – 2021. – Vol. 304. – P. 121438. – DOI 10.1016/j.fuel.2021.121438. – EDN JBLHOA.
9. Zhanforlin, S. Numerical analysis of methane direct injection in a single-cylinder 250 cm³ spark ignition engine / S. Zhanforlin, A. Boretti // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 81. – P. 883-896. – DOI 10.1016/j.egypro.2015.12.142.
10. Comparison Between Port Injection and Direct Injection of Natural Gas Engine: A Case Study in Vietnam / N. H. Nguyen, P. H. Cao, A. H. H. Ho, Q. D. Tran // Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024). – Cham : Springer, 2025. – Vol. 2. – P. 181-189. – DOI 10.1007/978-3-031-96122-9_23.
11. Evaluation and Simulation Analysis of Mixing Performance for Gas Fuel Direct Injection Engine under Multiple Working Conditions / H. Wang, T. Wang, J. Chen [et al.] // Actuators. – 2023. – Vol. 12, No. 6. – P. 239. – DOI 10.3390/act12060239. – EDN HROMBH.
12. Встовский, А. Л. Электрические машины : учебное пособие / А. Л. Встовский. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2013. – 462 с. – ISBN 978-5-7638-2518-3.

References

1. Perspektivy gazomotornogo rynka Rossii, Finansovyj universitet pri pravitel'stve Rossijskoj federacii, available at: https://www.fa.ru/university/structure/university/uso/press-service/press-releases/perspektivy-gazomotornogo-rynka-rossii?utm_source=chatgpt.com (09.03.2026).
2. Shatrov M.G., Hachiyani A.S., Sinyavskij V.V., Shishlov I.G. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2013, no. 4, pp. 29-32.
3. Shishkov V.A. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2010, no. 6 (18), pp. 51-57.
4. Genkin K.I. *Gazovye dvigateli* (Gas engines), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 193 p.
5. Agarwal A.K., Krishnan S.R., Mulone V., ed. by Srinivasan K. K. *Natural Gas Engines: For Transportation and Power Generation*, Singapore, Springer Singapore, 2019, 419 p., ISBN 978-981-13-3307-1, doi 10.1007/978-981-13-3307-1.

6. Matyuhin L.M. *Trudy NAMI*, 2024, no. 4 (299), pp. 36-44, doi 10.51187/0135-3152-2024-4-36-44.
7. Dubovkin N.F. *Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i ih produktam sgoraniya* (Handbook of Hydrocarbon Fuels and Their Combustion Products), Moscow, Leningrad, Gosenergoiz-dat, 1962, 288 p.
8. Kar T., Zhou Z., Brear M., Yang Y., Khosravi M., Lacey J. A comparative study of directly injected, spark ignition engine performance and emissions with natural gas, gasoline and charge dilution, *Fuel*, 2021, vol. 304, p. 121438, doi 10.1016/j.fuel.2021.121438.
9. Zanforlin S., Boretti A. Numerical analysis of methane direct injection in a single-cylinder 250 cm³ spark ignition engine, *Energy Procedia*, 2015, vol. 81, p. 883-896, doi 10.1016/j.egypro.2015.12.142.
10. Nguyen N.H., Cao P.H., Ho A.H.H., Tran Q.D. Comparison Between Port Injection and Direct Injection of Natural Gas Engine: A Case Study in Vietnam, *4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024)*, Proceedings conference, Cham, Springer, 2025, vol. 2, pp. 181-189, doi 10.1007/978-3-031-96122-9_23.
11. Wang H., Wang T., Chen J., Zhang L., Zheng Y., Li, L. Sun Y. Evaluation and Simulation Analysis of Mixing Performance for Gas Fuel Direct Injection Engine under Multiple Working Conditions, *Actuators*, 2023, vol. 12, no. 6, p. 239, doi 10.3390/act12060239.
12. Vstovskij A.L. *Elektricheskie mashiny* (Electrical Machines), Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2013, 462 p., ISBN 978-5-7638-2518-3.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплотехника и автотракторные двигатели», МАДИ

Информация об авторах

Илюшин Д. Н. – ст. преподаватель кафедры «Теплотехника и гидравлика», ВолгГТУ, Волгоград;
Темин Р. А. – аспирант кафедры «Теплотехника и гидравлика», ВолгГТУ, Волгоград;
Салыкин Е. А. – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Теплотехника и гидравлика», ВолгГТУ, Волгоград;
Федянов Е. А. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехника и гидравлика», ВолгГТУ, Волгоград.

Information about the authors

Ilyushin D. N. – Senior lecturer at the Department of Heat Engineering and Hydraulics, VSTU, Volgograd;
Temin R. A. – Postgraduate student at the Department of Heat Engineering and Hydraulics, VSTU, Volgograd;
Salykin E. A. – Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Heat Engineering and Hydraulics, VSTU, Volgograd;
Fedyanov E. A. – Doctor of Sciences (Technical), Professor of the Department of Heat Engineering and Hydraulics, VSTU, Volgograd.

Статья поступила в редакцию 09.04.2026; одобрена после рецензирования 04.05.2026; принята к публикации 24.06.2026.

The article was submitted 09.04.2026; approved after reviewing 04.05.2026; accepted for publication 24.06.2026.