

Научная статья
УДК 621.433

Влияние добавки синтез-газа на скорость распространения пламени в бензиновом роторно-поршневом двигателе

Роман Дмитриевич Дудников¹, Юрий Васильевич Левин²,
Евгений Алексеевич Федянов³

^{1,2,3}Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия
^{1,2,3}tig@vstu.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретического исследования влияния добавок синтез-газа к бензину на скорость распространения пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя. Исследование выполнено с помощью математической модели процесса распространения пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя, учитывающей все особенности геометрии и газодинамики этого типа двигателей, влияние добавок свободного водорода на нормальную скорость распространения пламени и длительность периода индукции при искровом зажигании. Модель позволяет определять скорость распространения фронтов пламени от двух свечей зажигания как в продольном, так и в поперечном направлении камеры сгорания. Получены картины распространения фронтов пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя при работе на бензине с добавками синтез-газа и водорода. Результаты моделирования процесса распространения пламени в бензовоздушной смеси с добавками водорода и синтез-газа в рабочей камере роторно-поршневого двигателя позволяют сделать вывод о том, что добавка синтез-газа, как и добавка водорода, позволяет повысить скорость распространения пламени и полноту сгорания топлива. При работе двигателя с добавками синтез-газа требуется изменение регулировок углов опережения зажигания.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель, процесс сгорания, синтез-газ.

Для цитирования: Дудников Р.Д., Левин Ю.В., Федянов Е.А. Влияние добавки синтез-газа на скорость распространения пламени в бензиновом роторно-поршневом двигателе // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Effect of the synthesis gas additive on the flame propagation velocity in a gasoline rotary piston engine

Roman D. Dudnikov¹, Yuri V. Levin², Evgeny A. Fedyanov³

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

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

Abstract. The results of a theoretical study of the effect of synthesis gas additives to gasoline on the flame propagation velocity in the combustion chamber of a rotary piston engine are presented. The study was carried out using a mathematical model of the flame propagation process in the combustion chamber of a rotary piston engine, taking into account all the features of the geometry and gas dynamics of this type of engines, the effect of free hydrogen additives on the normal flame propagation velocity and the duration of the induction period during spark ignition. The model allows you to determine the propagation velocity of the flame fronts from two spark plugs, both in the longitudinal and transverse direction of the combustion chamber. The patterns of propagation of flame fronts in the combustion chamber of a rotary piston engine when running on gasoline with additives of synthesis gas and hydrogen are obtained. The results of modeling the flame propagation process in a fuel-air mixture with hydrogen and synthesis gas additives in the working chamber of a rotary piston engine allow us to conclude that the addition of synthesis gas, as well as the addition of hydrogen, makes it possible to increase the speed of flame propagation and the completeness of fuel combustion. When the engine is running with synthesis gas additives, a change in the adjustments of the ignition timing angles is required.

Keywords: rotary piston engine, combustion process, synthesis gas.

For citation: Dudnikov R.D., Levin Yu.V., Fedyanov E.A. Effect of the synthesis gas additive on the flame propagation velocity in a gasoline rotary piston engine. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Вводная часть и новизна. В последнее десятилетие опубликованы результаты ряда исследований, в которых изучалась возможность повышения скорости распространения пламени и, тем самым, повышения полноты сгорания топлива в роторно-поршневых двигателях (РПД) за счет добавок в основную топливовоздушную смесь свободного водорода. Как следует из результатов этих исследований добавки свободного водорода в бензовоздушные и метановоздушные смеси позволяют снизить удельный

расход топлива (с учетом расхода водорода) и заметно уменьшить выбросы несгоревших углеводородов [3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Несмотря на очевидный положительный эффект от добавок свободного водорода, практическое использование подобного способа организации рабочего процесса РПД представляется в настоящее время проблематичным, так как требуется иметь на борту транспортного средства второй вид топлива, а именно водород. Сложности хранения водорода на борту транспортных средств хорошо известны, и именно они в значительной мере препятствуют широкому использованию водорода как самостоятельного вида топлива.

Свободный водород входит в состав синтез-газов [10, 11], получаемых конверсией углеводородов. Синтез-газ может быть получен непосредственно на двигателе конверсией основного углеводородного топлива, на котором работает двигатель. При этом для генерации синтез-газа можно использовать теплоту отработавших газов двигателя, осуществляя тем самым так называемую химическую рекуперацию в цикле. Термохимическая рекуперация теплоты позволяет снизить расход топлива.

Для того чтобы оценить эффект от добавок к основному углеводородному топливу синтез-газа на рабочий процесс бензинового роторно-поршневого двигателя, нами проведено теоретическое исследование влияния указанных добавок на процесс распространения пламени в его камере сгорания. Исследование выполнено с помощью неоднократно апробированной математической модели процесса распространения пламени в камере сгорания РПД [1, 2, 3, 5, 6, 7].

Методика исследования. Принятая в модели расчетная схема распространения пламени в камере сгорания отражает указанные выше основные особенности этого процесса (рис.1). В общем случае рассматривается зажигание от двух свечей – лидирующей ("L") и дожигающей ("T").

Свечи установлены в предкамерах, в которых после искрового разряда формируется начальный очаг горения. Из предкамер горение распространяется в объем основной камеры. От каждой из предкамер пламя распространяется по объему основной камеры сгорания, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Фронты пламени отделяют продукты сгорания от еще несгоревшей топливовоздушной смеси.

Зоны продуктов сгорания обозначены на схеме как b_1 (от свечи "Т") и b_2 (от свечи "L"). Так как указанные зоны продуктов сгорания в течение большей части процесса распространения пламени отделены друг от друга, в общем случае рассматриваются три зоны исходной топливовоздушной смеси.

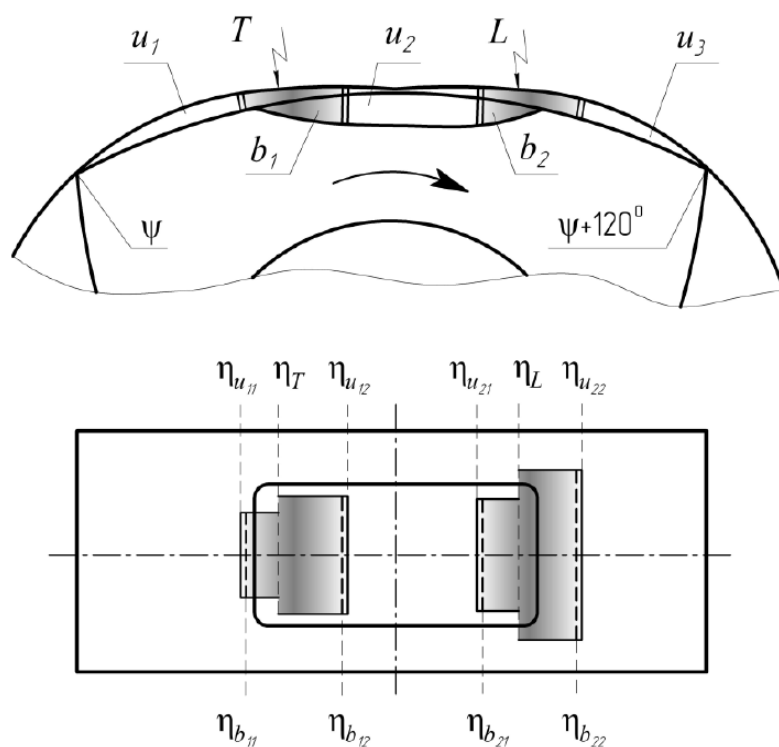


Рис. 1. Расчетная схема зон горения в рабочей камере РПД

ψ – угловая координата положения задней вершины ротора;
 η_T, η_L – угловые координаты центров воспламенения;
 $\eta_{u11}, \dots$ – угловые координаты передних границ фронтов пламени;
 $\eta_{b11}, \dots$ – угловые координаты зон продуктов сгорания

Первая зона (u_1 на рис. 1) располагается между зоной продуктов сгорания от свечи "Т" и задней по направлению вращения вершиной ротора,

вторая зона (u_2) между зонами продуктов сгорания, третья зона (u_3) между зоной продуктов сгорания от свечи "L" и передней вершиной ротора.

В модели предусмотрен расчет толщины зоны гашения пламени на стенках камеры сгорания. Гасящее расстояние у стенок в каждой зоне свежего заряда рассчитывается по формуле

$$\delta_{r_i} = C_4 \cdot \delta_{0i} \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\beta_1} \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\beta_2},$$

где $i = 1, 2, 3$ – номера зон свежего заряда; δ_{0i} – гасящее расстояние при нормальных условиях; p_i и T_i – давление и температура исходной топливовоздушной смеси в соответствующей зоне.

Влияние добавок свободного водорода и синтез-газа на период индукции, т.е. на продолжительность формирования начального очага горения при искровом зажигании в предкамерах, учитывалось введением в формулу для вычисления длительности периода индукции при работе на бензине поправочного коэффициента. Зависимость значений этого коэффициента от доли водорода была получена на основе результатов экспериментов, проведенных в камере сгорания постоянного объема [12].

Экспериментальная часть. Расчеты проведены применительно к роторно-поршневому двигателю ВАЗ-311 рабочим объемом 0,654 см³. Состав синтез-газа соответствовал тому, который получается при паровой конверсии углеводородов (11,5% H₂ и остальное CO₂). Добавка синтез газа составляла 18, 2% от массы подаваемого бензина. При этом массовая доля водорода в смесевом топливе составляла 2,5%. Состав топливовоздушной смеси с учетом добавки синтез-газа соответствовал стехиометрическому.

На рисунке 2 показаны кривые распространения пламени в рабочей камере роторно-поршневого двигателя ВАЗ-311 при работе на бензине, на бензине с добавкой водорода и на бензине с добавкой синтез-газа. Углы опережения зажигания во всех указанных случаях были неизменными и соответствовали оптимальным для работы на бензине. Как видно на рисунке,

при такой регулировке углов опережения зажигания вследствие различной продолжительности периода индукции горение в рабочей камере РПД начинается в различные моменты времени. При работе с добавками водорода и синтез-газа оно начинается раньше, и фронт пламени, движущийся в направлении задней по ходу вращения вершины ротора, преодолевает встречный поток, движущийся с большей скоростью. В случае, когда РПД работает на бензине с добавкой чистого водорода, большая скорость движения заряда в рабочей камере РПД компенсируется повышенной скоростью распространения пламени, вследствие добавки водорода.

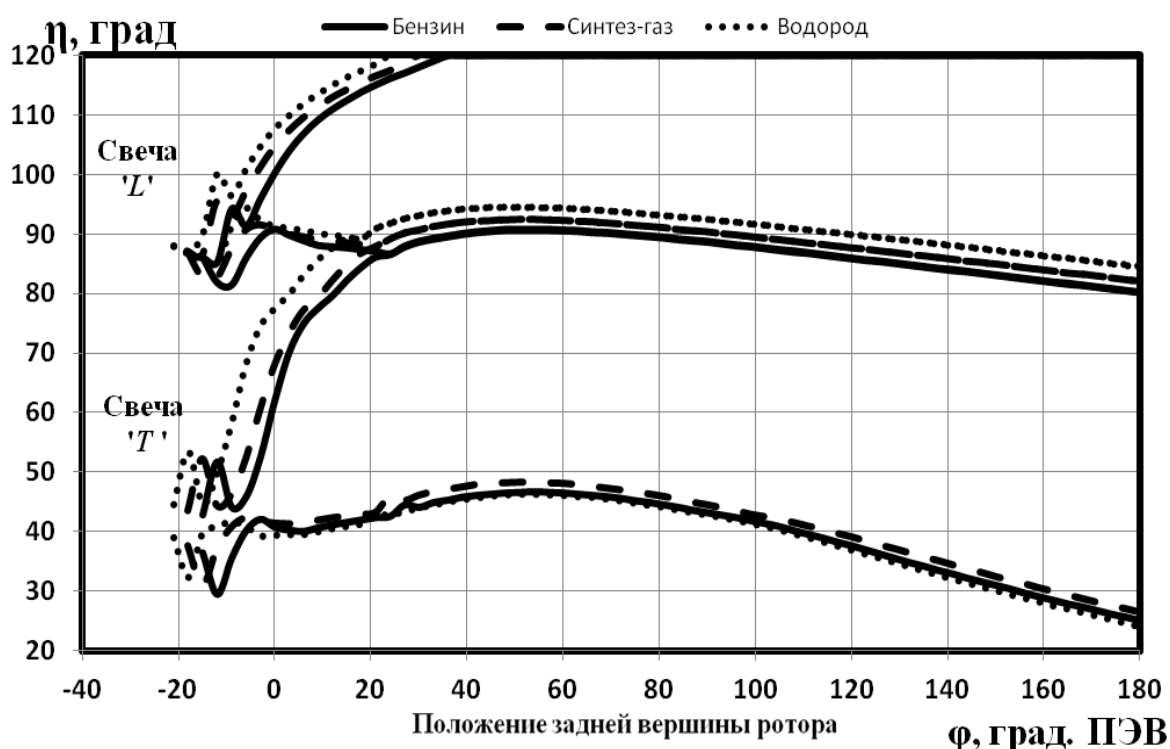


Рис.2. Распространение пламени по рабочей камере РПД ВАЗ-311 при работе на бензине с добавками водорода и синтез-газа и с УОЗ, оптимальными для бензина (η - угловая координата положений фронтов пламени относительно задней вершины ротора, ϕ - угол поворота эксцентрикового вала относительно ВМТ)

Положения фронтов пламени при работе на бензине и на бензине с добавкой водорода практически совпадают. Добавка синтез-газа, содержащего кроме свободного водорода некоторое количество диоксида

углерода, в меньшей степени, чем добавка чистого водорода, интенсифицирует процесс распространения пламени. В результате при работе на бензине с добавкой синтез-газа недогорание топливовоздушной смеси у задней вершины ротора при рассматриваемой регулировке углов опережения зажигания оказывается даже несколько большим, чем при работе на бензине без такой добавки.

Для достижения максимального эффекта от добавок водорода и синтез-газа к бензину необходимо учитывать изменение периода индукции и регулировать углы опережения зажигания таким образом, чтобы горение в рабочей камере начиналось при одном и том же положении ротора, при котором течение заряда в камере будет в наименьшей мере препятствовать распространению пламени в сторону задней вершины.

Например, с помощью математической модели были определены углы опережения зажигания для роторно-поршневого двигателя, работающего на бензине с добавками водорода, синтез-газа и без них. При работе на бензине оптимальный угол опережения зажигания для свечи «L» $\theta_L = 26$ град. поворота ротора до ВМТ, для свечи «Т» — $\theta_T = 30$ град. поворота ротора до ВМТ, при работе на бензине с добавкой свободного водорода, равной 2,5% от массы бензина, оптимальный угол для свечи «L» $\theta_L = 26$ град. поворота ротора до ВМТ, для свечи «Т» — $\theta_T = 24$ град. поворота ротора до ВМТ, при работе на бензине с добавкой синтез-газа, равной 18,2% от массы бензина, оптимальные углы опережения зажигания равны 28 и 22 град. поворота ротора до ВМТ.

На рисунке 3 показаны кривые распространения пламени с добавками водорода и синтез-газа при оптимальных углах опережения зажигания, учитывающих изменение периода индукции вследствие указанных добавок. Из графика видно, что добавка синтез-газа, как и добавка только водорода, позволяет повысить скорость распространения пламени в камере сгорания РПД и, соответственно, снизить недогорание топливовоздушной смеси

вблизи задней по ходу вращения вершины ротора. Вместе с тем в силу присутствия в составе синтез-газа инертного диоксида углерода эффект от добавки синтез-газа оказывается меньшим, чем от добавки только свободного водорода. При добавке к бензину водорода с массовой долей этого газа, равной 2,5% от массы бензина, угловая координата фронта пламени относительно задней вершины ротора на 2,7 градуса меньше, чем при добавке 18,2 % синтез-газа с содержанием водорода по отношению к массе бензина 2,5%.

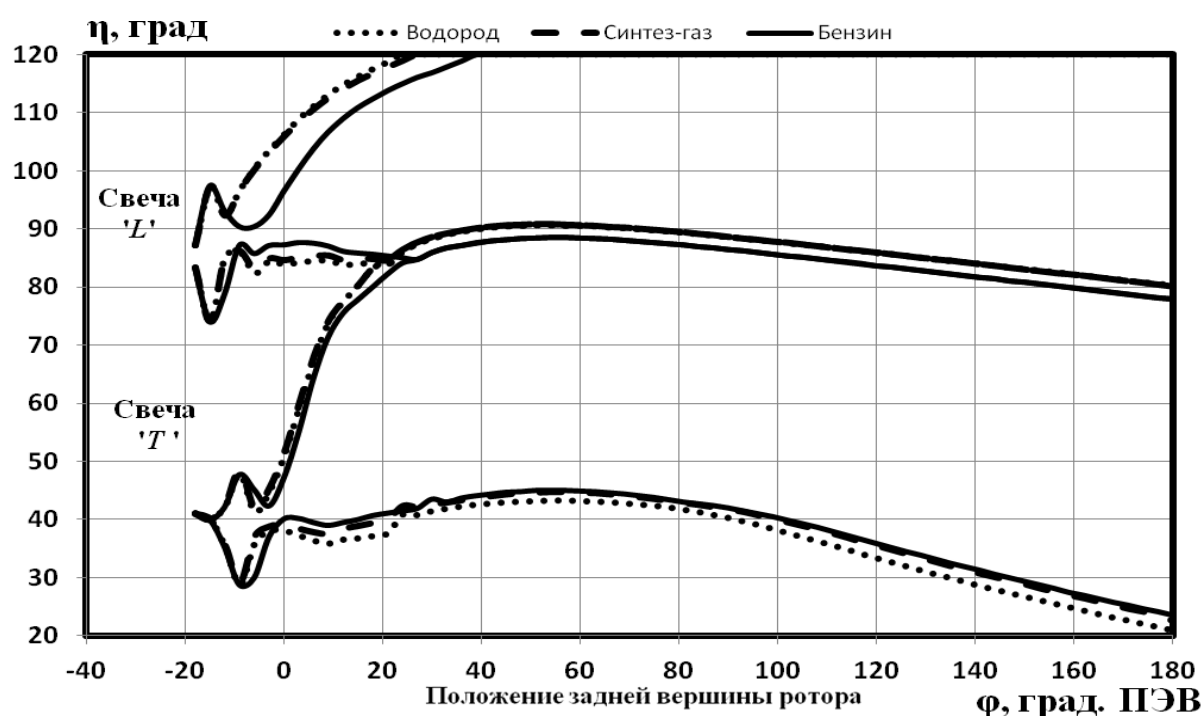


Рис.3. Распространение пламени по рабочей камере РПД ВАЗ-311 при работе на бензине с добавками водорода и синтез-газа и с УОЗ, учитывающими изменение периода индукции(η - угловая координата положений фронтов пламени относительно задней вершины ротора, ϕ - угол поворота эксцентрикового вала относительно ВМТ)

Выводы. Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что добавка синтез-газа к основному углеводородному топливу интенсифицирует процесс распространения пламени в камере сгорания в РПД и, соответственно, способствует снижению не догорающей доли топливовоздушной смеси вблизи задней по направлению вращения

вершины ротора. При одинаковой доле свободного водорода по отношению к массе бензина, его влияние на скорость распространения пламени слабее, если он добавлен в топливовоздушную смесь в составе синтез-газа.

Оптимальные углы опережения зажигания при работе РПД на бензине с добавками водорода или синтез-газа меньше соответствующих оптимальных углов при работе РПД только на бензине.

Список источников

1. Влияние добавки водорода на показатели роторно-поршневого двигателя Ванкеля / Е.А. Федянов, Ю.В. Левин, С.Н. Шумский, В.А. Алексейчук // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2015. – Т. 11, № 5(165). – С. 65-68.
2. Левин, Ю.В. Влияние добавки водорода на процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля / Ю.В. Левин, Е.А. Захаров, Е.А. Федянов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – № 12(115). – С. 35-36.
3. F. Amrouche, P. Erickson, J. Park, S. Varnhagen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39 – P. 8525 – 8534.
4. Мищенко, А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко – Киев: Наук. думка, 1984. – 143 с.
5. Моделирование индикаторного процесса роторно-поршневого двигателя с фазированным впрыском топлива / Г.Н. Злотин, Е.М. Иткис, Е.А. Федянов, С.Г. Черноусов // Двигателестроение. – 2002. – № 3(209). – С. 24-26.
6. Дудников, Р.Д. Математическая модель процесса сгорания углеводородного топлива с добавками синтез-газа в роторно-поршневом двигателе / Р.Д. Дудников, Ю.В. Левин, Е.А. Федянов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 4(37). – С. 49-52.
7. Левин, Ю.В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02: защищена 16.02.2017; утв. 12.07.2017 / Левин Юрий Васильевич. – Нижний Новгород, 2016. – 126 с.
8. Дульгер, М.В. Математическая модель одномерного течения в рабочей полости роторно-поршневого двигателя / М.В. Дульгер, Г.Н. Злотин, В.В. Малов; ВПИ. – Волгоград, 1981. – 9 с. – Деп. в НИИНавтороме 21.1981, Д681.

9. Зиновьев, И. В. Особенности процесса сгорания и организация расслоения заряда в роторно-поршневых двигателях / И. В. Зиновьев, Е. В. Шатров // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 12. – С. 7–10.
10. Злотин, Г.Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля / Г.Н. Злотин, Е.А. Федянов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2010. – 119 с. – ISBN 978-5-9948-0587-9.
11. Форсирование развития начального очага горения в ДВС с искровым зажиганием / Г.Н. Злотин, В. Гибадуллин, Е.А. Федянов [и др.] // Наука - производству. – 2000. – № 1. – С. 24-26.
12. Злотин, Г.Н. Начальный очаг горения при искровом зажигании гомогенных топливовоздушных объемах: монография / Г.Н. Злотин, Е.А. Федянов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 152 с. – ISBN 978-5-9948-0153-6.

References

1. Fedyanov, E.A., Levin, Y.V., Shumsky, S.N., Alekseychuk, V.A. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnyye transportnyye sistemy*, 2015, vol. 11, no. 11 (165), pp.65-68.
2. Levin Y.V., Zakharov E.A., Fedyanov E.A. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 12(115), pp. 35-36.
3. F. Amrouche, P. Erickson, J. Park, S. Varnhagen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, T. 39, P. 8525 – 8534.
4. Mishchenko, A.I. *Primeneniye vodoroda dlya avtomobil'nykh dvigateley* (Application of hydrogen for automobile engines), Kiev, Nauk. Dumka, 1984, 143 p.
5. Zlotin G.N, Itkis E.M., Fedyanov E.A., Chernousov S.G., *Dvigatelaystryeniye*, 2002, no. 3, pp.24-26.
6. Dudnikov R.D., Levin Y.V., Fedyanov E.A. *Energo- i resursoberezheniye: promyshlennost' i transport*, 2021. no. 4 (37). pp. 49-52.
7. Levin Y.B. *Uluchsheniye toplivnoy ekonomichnosti i ekologichnosti rotorno-porshnevogo dvigatelya za schet dobavok svobodnogo vodoroda k osnovnomu toplivu* (Improving fuel efficiency and environmental friendliness of a rotary piston engine due to the addition of free hydrogen to the main fuel), Candidate's thesis. Nizhny Novgorod, 2016, 126 p.
8. Dulger M.V., Zlotin G. N., Malov V.V. *Motor Engineering*, 1981, 9 p.
9. Zinoviev I. V., Shatrov E. V. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1980, no. 12, pp. 7-10.
10. Zlotin G.N., Fedyanov E.A. *Osobennosti rabochego protsessa i puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti rotorno-porshnevyykh dvigateley Vankelya* (Features of the working process and ways to improve the energy efficiency of Wankel rotary piston engines), Volgograd, Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2010, 119 p.

11. Zlotin G.N., Gibadullin V.Z., Fedyanov E.A., Shumsky S.N., Zakharov E.A., Svitachev A.Y. *Nauka - proizvodstvu*, 2000. no. 1. pp. 24-26.
12. Zlotin G.N., Fedyanov E.A. *Nachal'nyy ochag goreniya pri iskrovom zazhiganii gomogennykh toplivovozdushnykh ob'yemakh* (Initial combustion center during spark ignition of homogeneous air-fuel volumes), Volgograd, VolgGTU, 2008, 152 p.

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

Информация об авторах

Дудников Роман Дмитриевич, аспирант, ВолгГТУ.

Левин Юрий Васильевич, канд. техн. наук, доц., ВолгГТУ.

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

Information about the authors

Dudnikov Roman D., postgraduate, VSTU.

Levin Yuri V., Ph.D., associate professor. VSTU.

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

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

Статья поступила в редакцию 03.05.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 24.05.2023.

The article was submitted 03.05.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 24.05.2023.