



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19

УДК 629.113.004.67

Научная статья

## Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания

**А.Р. Асоян**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64;  
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

**И.К. Данилов, И.А. Асоян, Г.М. Полищук**

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 15 апреля 2020 г.

Доработана: 22 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 30 апреля 2020 г.

### Ключевые слова:

двигатели внутреннего сгорания, водород, ресурсосбережение нефтяных топлив, экологические показатели

Предложено техническое решение, способствующее снижению расхода основного углеводородного топлива, улучшению технико-экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания воздействием на процесс сгорания топливовоздушной смеси минимальной эффективной массовой долей добавки водорода в топливовоздушную смесь. Высокая скорость сгорания водородовоздушной смеси оказывает положительное влияние на повышение эффективности рабочего процесса. Воспламенение водорода происходит при достаточно широких пределах концентрации в воздухе. Пределы воспламенения: для водорода  $\alpha = 0,15-10$ ; для бензина  $\alpha = 0,27-1,7$ ; для метана  $\alpha = 0,65-2,0$ . Низкий предел воспламенения делает возможной работу двигателя на различных режимах с широким изменением состава смеси. Вопросы, связанные с аккумулярованием водорода на борту автомобиля, его хранением, взрывобезопасностью и многие другие, существенно тормозят развитие серийного производства автомобилей, работающих на водородном топливе. В связи с чем в качестве реальной альтернативы предложен метод применения малых добавок водорода в топливовоздушную смесь. Описанное техническое решение позволяет вырабатывать на борту автомобиля водород и без аккумулярования использовать его как добавку к основному топливу в двигателях внутреннего сгорания. Техническим результатом является снижение расхода углеводородного топлива (нефтяного происхождения) и повышение экологичности автомобиля вследствие снижения выброса вредных веществ в отработавших газах.

## Введение

Вопросы ресурсосбережения топлив нефтяного происхождения и снижения вредных выбро-

сов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС) актуальны и рассматривать их необходимо комплексно. Использование в ДВС экологически чистых топлив позволяет решать данные задачи.

Одним из таких топлив является водород, имеющий неограниченную сырьевую базу.

Общеизвестно, что коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания (особенно с искровым зажиганием) составляет около 30 %, а в городском режиме эксплуатации еще меньше. Использование водорода в качестве добавки к основному топливу позволяет снизить расход основного топлива и токсичность выпускных

*Асоян Артур Рафикович*, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» МАДИ, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>, [asoyan.ar@mail.ru](mailto:asoyan.ar@mail.ru)  
*Данилов Игорь Кеворкович*, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>.

*Асоян Игорь Артурович*, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

*Полищук Георгий Максимович*, профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор.

© Асоян А.Р., Данилов И.К., Асоян И.А., Полищук Г.М., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

газов за счет работы на более бедных смесях при качественном регулировании мощности.

Результаты исследований влияния водородо-воздушной смеси на показатели CO, CH в выхлопных газах дизельного двигателя (рис. 1) [1] сви-

детельствуют о том, что содержание CO в отработавших газах двигателя, работающего на дизельном топливе с добавками водорода, снижается (рис. 1, а) и практически позволяют исключить эмиссию CH с отработавшими газами (рис. 1, б).

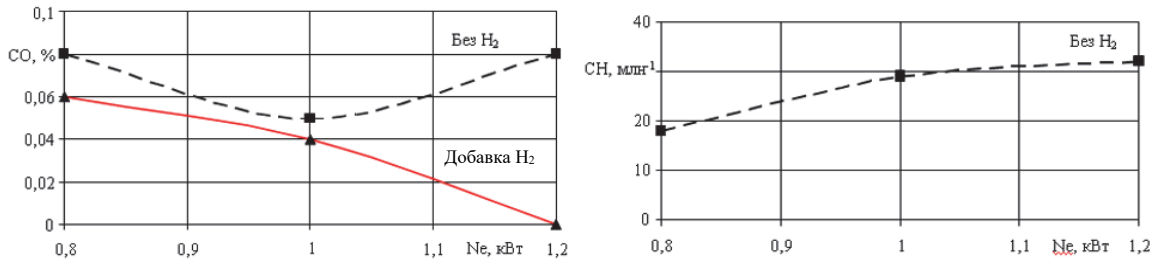


Рис. 1. Характеристики токсичности отработавших газов дизеля [1]:

---■--- работа на штатном топливе; —▲— работа на топливе с микродобавкой H<sub>2</sub>

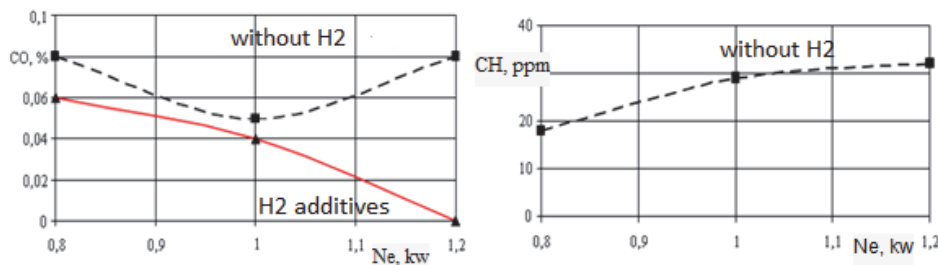


Figure 1. Diesel exhaust toxicity characteristics [1]:

---■--- work on piece fuel; —▲— work on fuel with microadditive H<sub>2</sub>

Высокая скорость сгорания водородовоздушной смеси и высокая скорость нарастания давления в цилиндрах двигателя способствуют повышению индикаторного КПД двигателя.

### 1. Влияние водорода на процесс сгорания основного топлива

Особенности рабочего процесса ДВС, использующих водород, определяются свойствами водородовоздушной смеси – пределами воспламенения и распространения фронта пламени, температурой и энергией воспламенения – все эти свойства у водорода лучше, чем у углеводородных топлив (см. таблицу) [2–4].

Имея скорость пламени, которая практически на порядок выше, чем у углеводородов, водород, действуя как своего рода катализатор «предварительного зажигания», воспламеняет рабочую смесь, обеспечивая полноту сгорания за короткое время,

большее давление и тепловую энергию, что способствует увеличению крутящего момента [5–7]. При более полном сгорании топлива уменьшаются выбросы вредных веществ в отработавших газах.

Нижний предел воспламенения водорода в несколько раз выше, чем у нефтяных топлив, что позволяет получить высокую экономичность по сравнению с ДВС, работающими на топливе нефтяного происхождения.

Удельный расход топлива определяем следующим образом:

$$gt = \frac{G_6 + G_{H_2} \cdot Q_{нH_2} / Q_{н6}}{N_e},$$

где G<sub>6</sub>, G<sub>H<sub>2</sub></sub> – расход бензина и водорода соответственно, г/ч; Q<sub>нH<sub>2</sub></sub>, Q<sub>н6</sub> – низшие теплоты сгорания водорода и бензина соответственно; N<sub>e</sub> – эффективная мощность двигателя [8].

Таблица

## Основные свойства бензина и водорода

Характеристики	Бензин	Водород
Плотность топлива, кг/м <sup>3</sup>	750	0,0899
Минимальная энергия воспламенения, МДж	0,24	0,02
Низшая теплотворная способность, МДж/кг	44	120
Стехиометрическое количество воздуха на 1 кг топлива, кг/кг	14,9	34,3
Максимальная ламинарная скорость сгорания, м/с	0,30	2,75
Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	0,06	0,63
Концентрационный предел распространения пламени, $\alpha$	$\alpha_{\max} - 0,40; \alpha_{\min} - 1,3$	$\alpha_{\max} - 0,22; \alpha_{\min} - 4,0$

Table

## The main properties of gasoline and hydrogen

Characteristics	Gasoline	Hydrogen
Density of fuel, kg/m <sup>3</sup>	750	0,0899
Minimum ignition energy, MJ	0,24	0,02
Lower calorific value, MJ/kg	44	120
Stoichiometric amount of air per 1 kg of fuel, kg/kg	14,9	34,3
Maximum laminar combustion rate, m/s	0,30	2,75
Diffusion coefficient, cm <sup>2</sup> /s	0,06	0,63
Concentration limit of flame propagation, $\alpha$	$\alpha_{\max} - 0,40; \alpha_{\min} - 1,3$	$\alpha_{\max} - 0,22; \alpha_{\min} - 4,0$

Работы по использованию водорода в ДВС ведутся давно [1; 2; 9–13], первый патент на использование водорода в качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания получил Франсуа Исаак де Риваз в 1807 году, тем не менее водород как топливо для ДВС не нашел широкого применения. Основными факторами, сдерживающими его использование, являются вопросы, связанные с взрывобезопасностью, хранением водорода на борту автомобиля, инфраструктурой – производством, перевозкой, хранением, заправочными станциями и т. д.

В связи с этим разработка компактного и безопасного оборудования по производству водорода на борту автомобиля – без его аккумулялирования и хранения – является актуальной задачей и одним из приоритетных направлений исследования [14; 15].

## 2. Техническое решение

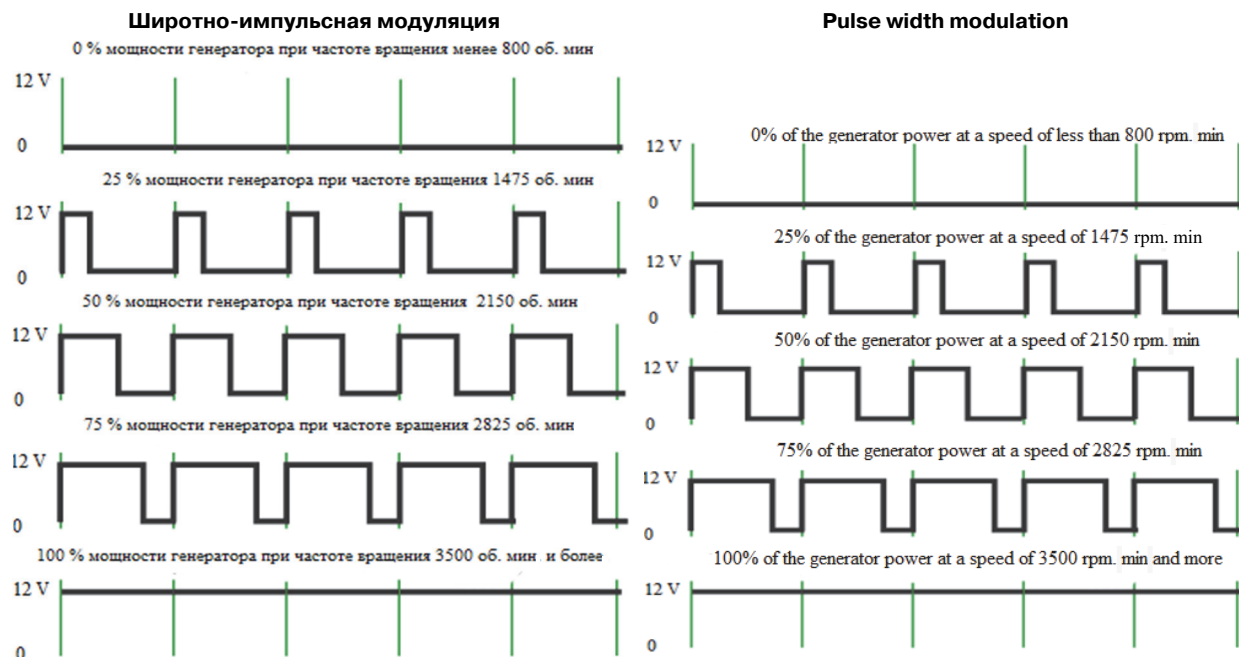
Предлагаемое устройство состоит из оборудования для получения водорода (электролизера, установленного в подкапотном пространстве, источников альтернативной энергии, аккумулятора электрической энергии) и трубопроводов подачи водорода в систему питания двигателя внутреннего сгорания [16].

От сгенерированной и саккумулялированной энергии обеспечивается работа электролизера, а получаемый газ (газ Брауна) без аккумулялирования и хранения направляется во впускной коллектор двигателя.

С целью обеспечения генерации необходимого объема водорода в соответствии с режимом работы двигателя внутреннего сгорания в конструкции предусмотрен электронный блок управления, позволяющий путем считывания импульсов с топливной форсунки изменять объем генерируемого газа в зависимости от частоты вращения коленчатого вала [16].

Путем математического преобразования определяется частота коленчатого вала, исходя из значений которой на выходе контроллера формируется ШИМ-сигнал (широотно-импульсная модуляция) (рис. 2), управляющий силовым ключом, обеспечивающим силу тока в цепи генератора водорода в заранее заданном диапазоне, например: 10 % мощности генератора задается при условии достижения частоты вращения коленчатого вала 800 об. мин., 100 % мощности задается при частоте коленчатого вала 3500 об. мин [16].

Применение широкоотно-импульсной модуляции позволяет управлять мощностью генератора водорода посредством изменения скважности импульсов при постоянной частоте. Задаваемые предельные значения частоты вращения коленчатого вала двигателя для достижения максимальной и минимальной мощности могут быть оперативно изменены установкой соответствующих значений в памяти электронного контроллера, что обеспечивает применение контроллера для различных двигателей.



**Рис. 2.** Зависимость мощности генератора водорода от частоты вращения коленчатого вала

**Figure 2.** The dependence of the power of the hydrogen generator on the rotational speed of the crankshaft

## Заключение

Перспективность применения водорода в качестве добавки к основному топливу ДВС с целью совершенствования показателей рабочего цикла двигателя обусловлена:

- возможностью снижения токсичности отработавших газов по основным компонентам CO, CH, NO<sub>x</sub>;
- снижением вредных выбросов в отработавших газах ДВС, достигаемым при повышении его топливной экономичности;
- практической реализацией предлагаемого способа без значительных конструктивных изменений ДВС.

## Список литературы

1. Авраменко А.Н., Левтеров А.М., Бганцев В.Н., Гладкова Н.Ю., Киреева В.Н. Перспективы применения микродобавок водорода для улучшения экологических показателей дизельного двигателя // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 22. No. 2.
2. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 143 с.
3. Бортников Л.Н., Русаков М.М. Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин – водород» // Автомобильная промышленность. 2008. № 2. С. 12–15.

4. Певнев Н.Г., Понамарчук В.В. Анализ свойств водорода с целью возможности его применения в качестве добавки к основному топливу // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. тр. конф. Оренбург, 2015. С. 304–309.

5. Gilchrist S., Rand T. Hydrogen fuel injection to improve engine efficiency the practical beginning of the hydrogen economy. Canada: Canadian Hydrogen Energy Company. 15 p. URL: <http://nha.confex.com/nha/2007/recordingredirect.cgi/id/196> (дата обращения: 20.04.2020 г.).

6. Кудряш А.П., Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Теоретические и экспериментальные исследования сгорания водорода в дизеле // Вопросы атомной техники и технологии. Серия: Ядерная техника и технологии. 1989. Вып. 2. С. 48–50.

7. Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Водородный дизель // Автомоб. пром-сть. 1992. № 2. С. 17–19.

8. Левин Ю.В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дис. ... к. т. н. Волгоград, 2016.

9. Крутенев В.Ф., Каменев В.Ф. Перспективы применения водородного топлива для автомобильных двигателей // Конверсия в машиностроении. 1997. № 6. С. 73–79.

10. Смоленский В.В., Смоленская Н.М., Шайкин А.П. Влияние добавки водорода на процесс горения в бензиновых двигателях с искровым зажиганием // Прогресс транспортных средств и систем – 2009: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. Волгоград, 2009. С. 247–248.

11. Шатров Е.В., Раменский А.Ю., Кузнецов В.М. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензино-водородных смесях // *Автомобильная промышленность*. 1979. № 11. С. 3–5.

12. Раменский А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин С.И. Применение водорода в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания. История, настоящее и перспективы // *Альтернативная энергетика и экология*. 2006. № 11. С. 63–70.

13. A History of the Automobile. URL: <https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932> (дата обращения: 19.04.2020 г.).

14. RONN Motor Group, Inc. (RMG/RONN). URL: <https://www.ronnmotorgroup.com/> (дата обращения: 20.04.2020 г.).

15. Roberts D. This company may have solved one of the hardest problems in clean energy // *Vox*. 2018, February 16. URL: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/2/16/16926950/hydrogen-fuel-technology-economyhytech-storage> (accessed: 20.04.2020).

16. Асоян А.Р., Битюков С.И., Лебедев И.А., Асоян И.А. Использование водорода в качестве добавки к основному топливу в двигателях внутреннего сгорания // *Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. научн. трудов по материалам 77-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ*. М., 2019. С. 103–108.

#### Для цитирования

Асоян А.Р., Данилов И.К., Асоян И.А., Полищук Г.М. Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 14–19. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19

Research paper

## Hydrogen application in internal combustion engines

Arthur R. Asoyan

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64 Leningradsky Ave, Moscow, 125319, Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Igor K. Danilov, Igor A. Asoyan, Georgy M. Polishchuk

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

#### Article history:

Received: April 15, 2020

Revised: April 22, 2020

Accepted: April 30, 2020

#### Keywords:

internal combustion engines, hydrogen, resource saving of petroleum fuels, environmental indicators

A technical solution has been proposed to reduce the consumption of basic hydrocarbon fuel, to improve the technical, economic and environmental performance of internal combustion engines by affecting the combustion process of the fuel-air mixture with a minimum effective mass fraction of hydrogen additive in the fuel-air mixture. The burning rate of hydrogen-air mixtures is an order of magnitude greater than the burning rate of similar mixtures based on gasoline or diesel fuel, compared with the former, they are favorably distinguished by their greater detonation stability. With minimal additions of hydrogen to the fuel-air charge, its combustion time is significantly reduced, since hydrogen, having previously mixed with a portion of the air entering the cylinder and burning itself, effectively ignites the mixture in its entirety. Issues related to the accumulation of hydrogen on board the car, its storage, explosion safety, etc., significantly inhibit the development of mass production of cars using hydrogen fuel. The described technical solution allows the generation of hydrogen on board the car and without accumulation to use it as an additive to the main fuel in internal combustion engines. The technical result is to reduce the consumption of hydrocarbon fuels (of petroleum origin) and increase the environmental friendliness of the car due to the reduction of the emission of harmful substances in exhaust gases.

Arthur R. Asoyan, Professor of the Department of Automotive Transport and Car Service of (MADI), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>, asoyan.ar@mail.ru

Igor K. Danilov, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>.

Igor A. Asoyan, graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Georgy M. Polishchuk, Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

## References

1. Avramenko AN, Levterov AM, Bgantsev VN, Gladkova NYu, Kireeva VN. Perspektivy primeneniya mikro-dobavok vodoroda dlya uluchsheniya ekologicheskikh pokazatelei dizel'nogo dvigatelya [Prospects for the use of hydrogen microadditives to improve the environmental performance of a diesel engine]. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019;22(2). (In Russ.)
2. Mishchenko AI. *Primenenie vodoroda dlya avtomobil'nykh dvigatelei* [The use of hydrogen for automotive engines]. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1984. (In Russ.)
3. Bortnikov LN, Rusakov MM. Otsenka ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazatelei porshnevnykh DVS s iskrovym zazhiganiem pri ikh rabote na smesi "benzin – vodorod" [Evaluation of the economic and environmental indicators of piston ICEs with spark ignition during their operation on a gas-hydrogen mixture]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*. 2008;(2):12–15. (In Russ.)
4. Pevnev NG, Ponamarchuk VV. Analiz svoystv vodoroda s tselyu vozmozhnosti ego primeneniya v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu [Analysis of the properties of hydrogen with a view to the possibility of its use as an additive to the main fuel]. *Progressivnye tehnologii v transportnykh sistemakh [Advanced technologies in transport systems]*: proceedings of conference. Orenburg; 2015. p. 304–309. (In Russ.)
5. Gilchrist S, Rand T. *Hydrogen fuel injection to improve engine efficiency the practical beginning of the hydrogen economy*. Canada: Canadian Hydrogen Energy Company. Available from: <http://nha.confex.com/nha/2007/recordingredirect.cgi/id/196> (accessed: April 20, 2020).
6. Kudryash AP, Marakhovsky VP, Kaydalov AA. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya sgoraniya vodoroda v dizele [Theoretical and experimental studies of hydrogen combustion in a diesel engine]. *Voprosy atomnoi tekhniki i tekhnologii. Seriya: Yadernaya tekhnika i tekhnologii [Questions of atomic engineering and technology. Series: Nuclear technics and technology]*. 1989;(2): 48–50. (In Russ.)
7. Marakhovsky VP, Kaydalov AA. Vodorodnyi dizel [Hydrogen diesel]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Auto industry]*. 1992;(2):17–19. (In Russ.)
8. Levin YuV. *Uluchshenie toplivnoi ekonomichnosti i ekologichnosti rotorno-porshnevoogo dvigatelya za schet dobavok svobodnogo vodoroda k osnovnomu toplivu [Improving fuel economy and environmental friendliness of a rotary piston engine due to the addition of free hydrogen to the main fuel]*: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Volgograd; 2016. (In Russ.)
9. Krutenev VF, Kamenev VF. Perspektivy primeneniya vodorodnogo topliva dlya avtomobil'nykh dvigatelei [Prospects for the use of hydrogen fuel for automotive engines]. *Konversiya v mashinostroenii [Conversion in mechanical engineering]*. 1997;(6):73–79. (In Russ.)
10. Smolensky VV., Smolenskaya NM, Shaikin AP. Vliyanie dobavki vodoroda na protsess goreniya v benzinovykh dvigatelyakh s iskrovym zazhiganiem [Influence of hydrogen additives on the combustion process in gas engines with spark ignition]. *Progress transportnykh sredstv i sistem – 2009 [Progress of Vehicles and Systems – 2009]*: materials of the International Scientific and Practical Conference (part 1). Volgograd; 2009. p. 247–248. (In Russ.)
11. Shatrov EV., Ramensky AYU, Kuznetsov VM. Issledovanie moshchnostnykh, ekonomicheskikh i toksicheskikh kharakteristik dvigatelya, rabotayushchego na benzino-vodorodnykh smesyakh [Study of power, economic and toxic characteristics of an engine running on gasoline-hydrogen mixtures]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*. 1979;(11):3–5. (In Russ.)
12. Ramensky AYU, Shelisch PB, Nefedkin SI. Primenenie vodoroda v kachestve motornogo topliva dlya avtomobil'nykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Istoriya, nastoyashchee i perspektivy [The use of hydrogen as a motor fuel for automotive internal combustion engines. History, present and prospects]. *Alternativnaya energetika i ekologiya [Alternative energy and ecology]*. 2006;(11):63–70. (In Russ.)
13. A History of the Automobile. Available from: <https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932> (accessed: April 19, 2020).
14. RONN Motor Group, Inc. (RMG/RONN). Available from: <https://www.ronnmotorgroup.com/> (accessed: April 20, 2020).
15. Roberts D. This company may have solved one of the hardest problems in clean energy. *Vox*. 2018, February 16. Available from: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/2/16/16926950/hydrogen-fuel-technology-economyhytech-storage> (accessed: April 20, 2020).
16. Asoyan AR, Bitukov SI, Lebedev IA, Asoyan IA. Ispol'zovanie vodoroda v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [The use of hydrogen as an additive to the main fuel in internal combustion engines]. *Problemy tekhnicheskoi ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta [Problems of technical operation and car service of rolling stock of motor vehicles]*: collection of proceedings on the materials of the 77<sup>th</sup> Scientific-Methodological and Scientific-Research Conference of MADI. Moscow; 2019. p. 103–108. (In Russ.)

## For citation

Asoyan AR, Danilov IK, Asoyan IA, Polishchuk GM. Hydrogen application in internal combustion engines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):14–19. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19> (In Russ.)