

ISSN 1561-8358 (Print)
 ISSN 2524-244X (Online)
 УДК 536.46:533.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

Поступила в редакцию 24.11.2017
 Received 24.11.2017

М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
 Минск, Беларусь*

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА СМЕСИ БЕНЗИНА С ВОЗДУХОМ, ОБОГАЩЕННОЙ ВОДОРОДОМ

Аннотация. Изучено влияние добавок водорода на рабочий процесс бензинового двигателя внутреннего сгорания поршневого типа. Построена индикаторная диаграмма и дан анализ работы поршневого двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом в размере 0...20 % от объема поступающего в двигатель воздуха. Показана возможность получения удовлетворительных показателей при работе на бензине с добавками водорода. Исследовано изменение работы двигателя в зависимости от коэффициента избытка окислителя. Установлено, что коэффициент избытка окислителя, при котором достигается максимум индикаторного давления, смещается в область бедных смесей. При обогащении смеси водородом в размере 20 % от объема воздуха максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 5,3...5,8$ МПа, достигается при $\alpha = 1,15...1,25$, а при 10%-ной добавке водорода имеет место максимум $p_{i\max} = 4,9...5,2$ МПа при $\alpha = 1,05...1,10$ против $p_{i\max} = 4,7...5,1$ МПа при $\alpha = 0,90...0,95$ для чистого бензина. По индикаторной диаграмме изучена динамика внутрицилиндровых параметров при обогащении смеси водородом. Так, при 20%-ной добавке водорода среднее индикаторное давление падает на 12...19 %, несмотря на некоторое возрастание максимального давления цикла (на 3...18 %), по сравнению с работой на бензине, что ведет к пропорциональному снижению как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД.

Ключевые слова: поршневой двигатель, бензин, водород, индикаторная диаграмма, индикаторное давление, коэффициент избытка окислителя

Для цитирования. Ассад, М. С. Рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания на смеси бензина с воздухом, обогащенной водородом / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 214–219. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

M. S. Assad, O. G. Penyazkov, I. N. Tarasenko

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

WORKING PROCESS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE RUNNING ON ENRICHED HYDROGEN GASOLINE-AIR MIXTURE

Abstract. The effect of hydrogen additives on the working process of a piston-type gasoline engine is studied. The indicator diagram has been built, and the operation of the piston engine on gasoline-air mixtures enriched with hydrogen in the amount of 0...20 % of the volume of air entering the engine has been analyzed. The possibility of obtaining satisfactory parameters when the engine works on gasoline with hydrogen additives is shown. The dynamics of the engine performance is studied depending on the oxidant excess coefficient. It has been established that the oxidizer excess ratio at which the maximum indicator pressure is reached is moved to the zone of poor mixtures. When the mixture is enriched with hydrogen in the amount of 20 % of the air volume, the maximum of indicator pressure $p_{i\max} = 5.3...5.8$ MPa is reached at $\alpha = 1.15...1.25$, while for 10 % hydrogen addition the maximum $p_{i\max} = 4.9...5.2$ MPa takes place at $\alpha = 1.05...1.10$ against $p_{i\max} = 4.7...5.1$ MPa at $\alpha = 0.90...0.95$ for pure gasoline. According to the indicator diagram, the dynamics of intra-cylinder parameters is studied when the mixture is enriched with hydrogen. Thus, with a 20 % hydrogen addition the mean indicator pressure decreases by 12...19 %, despite a slight increase in the maximum cycle pressure (3...18 %), compared with gasoline operation, which leads to a proportional decrease in both the engine indicator power, and the indicator efficiency.

Keywords: piston engine, gasoline, hydrogen, indicator diagram, indicator pressure, oxidant excess ratio

For citation. Assad M. S., Penyazkov O. G., Tarasenko I. N. Working process of the internal combustion engine running on enriched hydrogen gasoline-air mixture. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 214–219 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

Введение. Тепловые энергоустановки (двигатели внутреннего и внешнего сгорания, котельные установки и др.) являются основным потребителем углеводородного топлива и одним из главных источников загрязнения окружающей среды. Это обстоятельство, наряду с истощением мировых запасов нефти, обуславливает необходимость разработки и создания принципиально

новых двигателей и применения новых видов моторного топлива. В качестве перспективного топлива можно рассматривать водород, который характеризуется хорошими физико-химическими и моторными свойствами, о чем свидетельствуют многочисленные исследования [1–12].

Основным процессом, определяющим эффективность работы двигателя, является сгорание, в течение которого химическая энергия введенного в цилиндр топлива превращается в тепло. Характер процесса сгорания определяется множеством факторов, среди которых: вид и состав применяемого топлива, содержание окислителя, момент воспламенения (угол опережения зажигания), степень сжатия, нагрузка и скоростной режим двигателя. В рамках настоящего исследования ставилась задача построить индикаторную диаграмму и выявить особенности рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при питании бензином с разной степенью обогащения водородом.

Индицирование процесса горения в цилиндре. Индикаторная диаграмма является главным инструментом для понимания протекания рабочего процесса поршневого ДВС. Измерение давления в цилиндре и последующее построение индикаторной диаграммы дают возможность выявить практическую ценность и эффективность использования топлива в данном двигателе.

Индицирование давления в цилиндре двигателя осуществлялось с помощью специально разработанной системы, приведенной в [13]. Опыты проводились на подробно описанном в [10] экспериментальном стенде, ядром которого является двигатель Honda D15B2. Давление, развиваемое при сгорании топлива в цилиндре, передавалось на датчик через соединительный канал, проходящий через корпус свечи зажигания и сообщенный с надпоршневым пространством. Для регистрации давления использовались два типа датчиков производства фирмы PCB Piezotronics и Научно-исследовательского института физических измерений (г. Пенза, Россия). В этих датчиках в качестве чувствительного элемента применен пакет пьезокерамических дисков.

Общая характеристика работы двигателя. Широкие концентрационные пределы воспламенения водорода в смеси с воздухом ($\alpha = 0,15 \dots 10,0$) позволили получить удовлетворительную работу двигателя на оклостехиометрических и бедных смесях с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,95 \dots 2,55$. Двигатель работал на режимах холостого хода и средней нагрузки с частотами вращения коленчатого вала $n = 740 \dots 3800 \text{ мин}^{-1}$. Добавка водорода χ варьировала в пределах от 0 до 20 % от объема поступающего в двигатель воздуха.

Анализ полученных результатов позволил заключить, что на исследованных режимах работы двигателя сгорание является практически полным. Концентрация остаточного водорода в продуктах сгорания, измеренная газоанализатором Testo, не превышает сотых долей процента, что явилось основанием для данного заключения. В диапазоне $\alpha = 0,95 \dots 1,4$ имеет место устойчивая работа двигателя со склонностью к перегреву в области стехиометрического состава смеси; с дальнейшим увеличением $\alpha > 1,4$ устойчивость работы двигателя падает.

Что касается детонационно-подобных явлений, отметим, что склонность бензин-водородно-воздушной смеси к детонации в исследованном двигателе (Honda D15B2) существенно зависит от коэффициента избытка окислителя α и степени обогащения смеси водородом χ . Такое сгорание имеет место при большой добавке водорода ($\chi > 15 \%$ по воздуху) и обогащенных составах смеси ($\alpha < 0,95$). Склонность к детонации снижается с увеличением α и в области бедных смесей практически исчезает. Так, при работе двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом до 20 % от воздуха, со значениями $\alpha = 1,15 \dots 2,55$ признаки детонации не наблюдались, при этом сохранилась склонность двигателя к перегреву. Последний эффект объясняется повышенными значениями температуры горения водорода (примерно на 110...150 °С) сравнительно с бензином. Хотя в [8, 9] отмечается низкая детонационная стойкость водородно-воздушных смесей при составах, близких к стехиометрическому. Противоречие в отношении детонации при использовании водорода связано, по-видимому, с различием в подходах к организации рабочего процесса при питании двигателя водородом, а также с разной степенью совершенства опытных двигателей, используемых в разных исследованиях.

Влияние коэффициента избытка окислителя на рабочий процесс ДВС. Анализ рабочего процесса ДВС показывает, что среднее индикаторное давление в цилиндре имеет экстремальный характер при обогащении смеси воздухом. При этом значение коэффициента избытка окислителя,

при котором достигается максимум индикаторного давления, и величина этого максимума зависят от степени обогащения смеси водородом. Добавка водорода в размере 10 % от объема воздуха приводит к тому, что максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 4,9 \dots 5,2$ МПа, достигается при $\alpha = 1,05 \dots 1,10$. Дальнейшее обогащение смеси водородом до 20 % несколько поднимает пик давления до $p_{i\max} = 5,3 \dots 5,8$ МПа, который наблюдается при $\alpha = 1,15 \dots 1,25$ против $p_{i\max} = 4,7 \dots 5,1$ МПа при $\alpha = 0,90 \dots 0,95$ для чистого бензина. Некоторое смещение $p_{i\max}$ в область бедных смесей при добавлении водорода является следствием роста коэффициента молекулярного изменения по мере увеличения коэффициента избытка окислителя (рис. 1).

Суммарный коэффициент молекулярного изменения μ_0^Σ для смесей бензина с воздухом, обогащенных водородом, вычисляем с помощью выражения

$$\mu_0^\Sigma = \mu_0^{\text{H}_2} \cdot \beta + \mu_0^{\text{Gasoline}} \cdot (1 - \beta), \quad (1)$$

где $\mu_0^{\text{H}_2}$ – коэффициент молекулярного изменения при окислении водорода с воздухом, равный 0,852; μ_0^{Gasoline} – коэффициент молекулярного изменения при окислении бензина с воздухом, равный 1,058.

Используя данное выражение, влияние коэффициента избытка окислителя α на суммарный коэффициент молекулярного изменения μ_0^Σ можно выразить следующей зависимостью:

$$\mu_0^\Sigma = \frac{2,88 + 2,38(\alpha - 1)}{1 + 2,38\alpha} \cdot \beta + \frac{64 + 59,5(\alpha - 1)}{1 + 59,5\alpha} \cdot (1 - \beta).$$

Результаты исследования индикаторной диаграммы двигателя. Термодинамические и, в некоторой степени, теплофизические характеристики процесса сгорания удобно оценивать по индикаторной диаграмме, которая является основным инструментом исследования рабочих процессов двигателей. Анализ индикаторной диаграммы, построенной для различных режимов и условий работы исследованного двигателя (Honda D15B2), показал, что максимальное давление цикла при работе на смесях бензина с водородом выше, чем на бензине, при этом среднее индикаторное давление, характеризующее работу за цикл, наоборот, ниже. На рис. 2 в качестве примера представлена индикаторная диаграмма, снятая при добавках водорода 0...20 % от объема воздуха, при одинаковых коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1,18$, частоте вращения коленчатого вала $n = 2670$ мин⁻¹ и при оптимальном угле опережения зажигания для каждой смеси. Видно, что обогащение бензин-воздушной смеси водородом до 20 % от объема воздуха увеличивает максимальное давление цикла примерно на 19 % и смещает его пик по углу кривошипа на 6°. При этом среднее индикаторное давление явно падает на 3...18 % по сравнению с работой на чистом бензине, что ведет к пропорциональному снижению как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД цикла. Хотя, по данным [12], обогащение бензин-воздушной смеси водородом приводит к снижению индикаторного давления, а максимальные давления цикла пример-

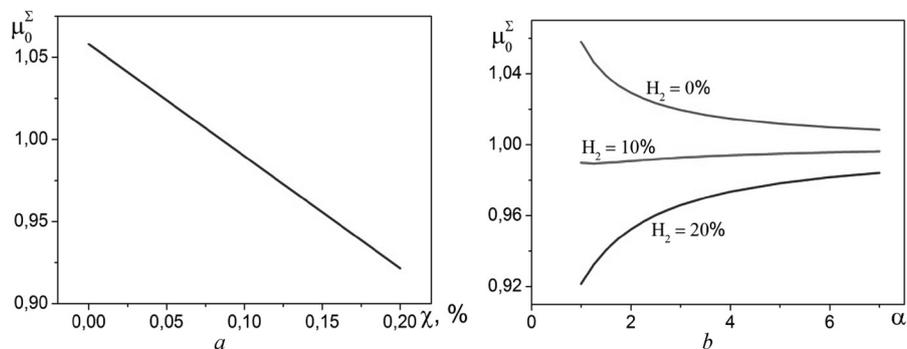
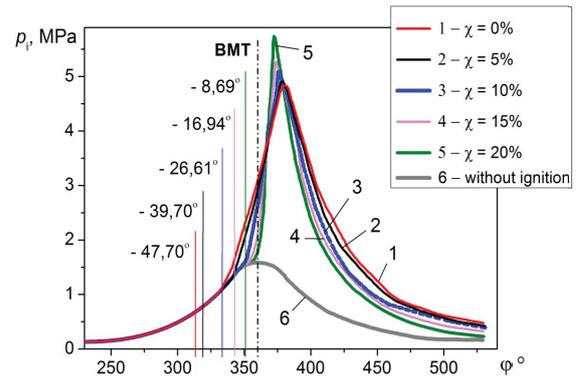


Рис. 1. Зависимость коэффициента молекулярного изменения от содержания водорода в топливно-воздушной смеси (а) и от степени обеднения смеси топливом (б)

Fig. 1. Ratio of molecular changes vs. the amount of hydrogen in a fuel/air mixture (a) and the degree of depletion of a fuel-enriched mixture (b)

Рис. 2. Индикаторная диаграмма двигателя при работе двигателя на бензине с добавками водорода: 1 – $H_2 = 0\%$, $\varphi = 47,70^\circ$; 2 – $H_2 = 5\%$, $\varphi = 39,70^\circ$; 3 – $H_2 = 10\%$, $\varphi = 26,61^\circ$; 4 – $H_2 = 15\%$, $\varphi = 16,94^\circ$; 5 – $H_2 = 20\%$, $\varphi = 8,69^\circ$; 6 – без зажигания ($\alpha = 1,18$; $n = 2670 \text{ мин}^{-1}$)

Fig. 2. Indicator diagram of the H_2 -enriched gasoline engine mode: 1 – $H_2 = 0\%$, $\varphi = 47,70^\circ$; 2 – $H_2 = 5\%$, $\varphi = 39,70^\circ$; 3 – $H_2 = 10\%$, $\varphi = 26,61^\circ$; 4 – $H_2 = 15\%$, $\varphi = 16,94^\circ$; 5 – $H_2 = 20\%$, $\varphi = 8,69^\circ$; 6 – no ignition ($\alpha = 1.18$; $n = 2670 \text{ min}^{-1}$)



но одинаковы. Такое различие, как отмечалось выше, вероятно, результат исследования разных двигателей с разным уровнем совершенства рабочего процесса. Очевидно, эффект уменьшения среднего индикаторного давления является следствием снижения объемной теплотворной способности смеси, вызванной наличием водорода, которая выражается следующим образом:

$$h_u^\Sigma = h_u^{H_2} \cdot \beta + h_u^{\text{Gasoline}} \cdot (1 - \beta), \quad (2)$$

где $h_u^{H_2}$ – объемная теплота сгорания водородно-воздушной смеси, равная $h_u^{H_2} = \frac{H_u^{H_2}}{1 + \alpha L_o^{H_2}}$ (при $\alpha \geq 1$), $h_u = \frac{H_u^{H_2} - \Delta H_u^{H_2}}{1 + \alpha L_o^{H_2}}$ (при $\alpha < 1$); h_u^{Gasoline} – объемная теплота сгорания бензин-воздушной

смеси, равная $h_u^{\text{Gasoline}} = \frac{H_u^{\text{Gasoline}}}{1 + \alpha L_o^{\text{Gasoline}}}$ (при $\alpha \geq 1$), $h_u = \frac{H_o^{\text{Gasoline}} - \Delta H_o^{\text{Gasoline}}}{1 + \alpha L_o^{\text{Gasoline}}}$ (при $\alpha < 1$);

$H_u^{H_2} = 240,74 \text{ МДж/кмоль}$ – низшая теплота сгорания 1 кмоль водорода; $H_u^{\text{Gasoline}} = 43,961 \text{ МДж/кг}$ – низшая теплота сгорания 1 кг бензина; μ_{Gasoline} – средняя молярная масса бензина (изооктана), равная 115 г/моль; β – объемная доля водородно-воздушной части в комбинированной горючей смеси стехиометрического состава (объем всей смеси принимается равным объему камеры сгорания с учетом коэффициента наполнения 0,95), вычисленная по формуле $\beta = \delta \chi (1 + L_o^{H_2})$ ($\delta = 0,98$ – коэффициент, учитывающий объемную долю воздуха в стехиометрической реакции окисления бензина); χ – доля водорода относительно объема поступающего в двигатель воздуха; $L_o^{H_2} = 2,38$ – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 моля водорода, которое находим из стехиометрического уравнения баланса $H_2 + 0,5O_2 + 1,88N_2 \rightleftharpoons H_2O + 1,88N_2$; $(1 - \beta)$ – объемная доля бензин-воздушной части в комбинированной горючей смеси.

Уравнение (2) показывает вклад водорода в теплотворную способность смеси. Поскольку $h_u^{H_2}$ всегда меньше h_u^{Gasoline} , то тем меньше общая теплота сгорания смеси, чем больше доля водорода в ней.

На основании изложенного можно заключить, что наличие водорода в топливно-воздушной смеси вызывает падение индикаторной эффективности цикла. Это падение можно представить как безразмерную величину, равную единице минус отношения индикаторных давлений при сгорании обогащенной водородом смеси и базовой бензин-воздушной смеси:

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{P_i(\text{gasoline}+H_2)}{P_i(\text{gasoline})}. \quad (3)$$

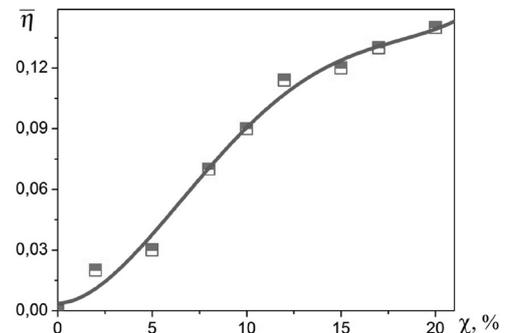


Рис. 3. Зависимость падения индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ в цилиндре от содержания водорода в смеси χ ($n = 2180 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 1,04$)

Fig. 3. Lowering of the indicated efficiency $\bar{\eta}$ in the cylinder vs. hydrogen content in the mixture χ ($n = 2180 \text{ min}^{-1}$; $\alpha = 1.04$)

На рис. 3 показано изменение падения индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ цикла в зависимости от степени обогащения смеси водородом. Видно, что с увеличением содержания водорода величина $\bar{\eta}$ увеличивается и при 20%-ной добавке водорода составляет 14 %. Падение индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ имеет следующую полиномиальную зависимость от доли водорода χ в смеси:

$$\bar{\eta} = 0,00361 + 4,12329 \cdot 10^{-4} \chi + 0,00187 \chi^2 - 1,30437 \cdot 10^{-4} \chi^3 + 2,64989 \cdot 10^{-6} \chi^4.$$

Заклучение. По результатам экспериментального исследования построена индикаторная диаграмма и проведен анализ работы поршневого двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом в размере 0...20 % от объема поступающего в двигатель воздуха. Показана возможность получения удовлетворительных показателей при работе на бензине с добавками водорода.

Коэффициент избытка окислителя, при котором достигается максимум индикаторного давления, смещается в область бедных смесей. При обогащении смеси водородом в размере 20 % от объема воздуха максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 5,3...5,8$ МПа, получается при $\alpha = 1,15...1,25$, а при 10%-ной добавке водорода имеет место максимум $p_{i\max} = 4,9...5,2$ МПа при $\alpha = 1,05...1,10$ против $p_{i\max} = 4,7...5,1$ МПа при $\alpha = 0,90...0,95$ для чистого бензина.

Среднее индикаторное давление при обогащении смеси водородом снижается. При 20%-ной добавке водорода индикаторное давление падает на 12...19 %, несмотря на некоторое возрастание максимального давления цикла (на 3...18 %) по сравнению с работой на бензине, что ведет к пропорциональному снижению, как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД.

Список использованных источников

1. Andrea, T. D. The addition of hydrogen to a gasoline-fueled SI engine / T. D. Andrea, P. F. Henshaw, D. S.-K. Ting // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2004. – Vol. 29, № 14. – P. 1541–1552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.002>
2. De Boer, P. C. T. Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines / P. C. T. De Boer, W. J. McLean, H. S. Homan // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1976. – Vol. 1, iss. 2. – P. 153–172.
3. Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures / S. O. Akansua [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2004. – Vol. 29, iss. 14. – P. 1527–1539. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
4. Karim, G. A. Methane-hydrogen mixtures as fuels / G. A. Karim, I. Wierzbza, Y. Al-Alousi // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1996. – Vol. 21, iss. 7. – P. 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
5. Ogden, J. M. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development / J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, T. G. Kreutz // *J. Power Sources*. – 1999. – Vol. 79, iss. 2. – P. 143–168. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9)
6. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications / K. Agbossou [et al.] // *J. Power Sources*. – 2001. – Vol. 96, iss. 1. – P. 168–172. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00495-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00495-5)
7. Scenarios for a clean energy future / M. A. Brown [et al.] // *Energy Policy*. – 2001. – Vol. 29, iss. 14. – P. 1179–1196. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00066-0)
8. Ricardo, H. R. *The High-Speed Internal Combustion Engine* / H. R. Ricardo. – Glasgow: Blackie Publ., 1953. – 435 p.
9. Хмыров, В. И. Исследование рабочего процесса поршневого двигателя на водородно-воздушных смесях / В. И. Хмыров, Б. Е. Лавров // *Труды Института энергии АН КазССР: сб. науч. тр.* – Алма-Ата: Наука КазССР, 1958. – Т. 1. – С. 17–25.
10. Ассад, М. С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 305 с.
11. Горение водородсодержащих смесей в модели камеры сгорания ДВС / М. С. Ассад [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2009. – Т. 82, № 6. – С. 1031–1045. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0291-9>
12. Анализ работы поршневого двигателя на водороде / И. Л. Варшавский [и др.] // *Изв. Высш. учеб. заведений. Машиностроение*. – 1977. – № 10. – С. 110–114.
13. Ассад, М. С. Особенности работы двигателя внутреннего сгорания на водородсодержащих топливах / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков // *Инженерно-физический журнал*. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 814–820. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0408-1>

References

1. Andrea T. D., Henshaw P. F., Ting D. S.-K. The addition of hydrogen to a gasoline-fueled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, vol. 29, iss. 14, pp. 1541–1552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.002>
2. De Boer P. C. T., McLean W. J., Homan H. S. Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1976, vol. 1, iss. 2, pp. 153–172. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(76\)90068-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(76)90068-9)
3. Akansua S. O., Dulgerb Z., Kahramana N., Veziroğlu T. N. Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, vol. 29, iss. 14, pp. 1527–1539. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>

4. Karim G. A., Wierzba I., Al-Alousi Y. Methane-hydrogen mixtures as fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1996, vol. 21, iss. 7, pp. 625–631. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00134-4)
5. Ogden J. M., Steinbugler M. M., Kreutz T. G. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. *Journal of Power Sources*, 1999, vol. 79, iss. 2, pp. 143–168. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9)
6. Agbossou K., Chahine R., Hamelin J., Laurencelle F., Anouar A., St-Arnaud J. M., Bose T. K. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 96, pp. 168–172. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00495-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00495-5)
7. Brown M. A., Levine M. D., Short W., Koomey J. G. Scenarios for a clean energy future. *Energy Policy*, 2001, vol. 29, iss. 14, pp. 1179–1196. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00066-0)
8. Ricardo H. R. *The High-Speed Internal Combustion Engine*. Glasgow, Blackie Publ., 1953. 435 p.
9. Khmyrov V. I., Lavrov B. E. Investigation of the working process of a piston engine on hydrogen-air mixtures. *Trudy Instituta energii Akademii nauk Kazakhskoi SSR: sbornik nauchnykh trudov. Tom 1* [Proceedings of the Institute of Energy of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR: a collection of scientific papers. Vol. 1]. Alma-Ata, Nauka KazSSR, 1958, pp. 17–25 (in Russian).
10. Assad M. S., Penyazkov O. G. *Products of combustion of liquid and gaseous fuels. Formation, calculation, experiment*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 305 p. (in Russian).
11. Assad M. S., Leshchevich V. V., Mironov V. N., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Skilond' A. V. Burning of hydrogenous mixtures in the model of an internal-combustion-engine chamber. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, iss. 6, pp. 1042–1058. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0291-9>
12. Varshavskii I. L., Mishchenko A. I., Makarov A. A., Talda G. B. Analysis of operation of a hydrogen piston engine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1977, no. 10, pp. 110–114 (in Russian).
13. Assad M. S., Penyazkov O. G. Distinctive features of operation of an internal combustion engine running on hydrogen-containing fuels. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, iss. 4, pp. 869–875. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0408-1>

Информация об авторах

Ассад Мохамед Сабетович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: assad@hmti.ac.by

Пенязков Олег Глебович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, директор, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnr.itmo.by

Тарасенко Илья Николаевич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yayo@tut.by

Information about the authors

Mohamad S. Assad – D. Sc. (Engineering), Leading Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: assad@hmti.ac.by

Oleg G. Penyazkov – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnr.itmo.by

Ilya N. Tarasenko – Ph. D. Student, Junior Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yayo@tut.by