

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.43.052

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ИСКРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.Н. Кабанов, доцент, к.т.н.,
А.П. Кузьменко, аспирант, Э.Р. Муртазаев, студент, ХНАДУ**

Аннотация. Приведены результаты расчётной оценки энергии воспламенения топливовоздушных смесей газовых двигателей. Выполнено исследование влияния добавок водорода в различных пропорциях на процесс воспламенения топливовоздушной смеси в газовом двигателе.

Ключевые слова: газовый двигатель, энергия воспламенения, топливо, сжатый природный газ, водород.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАПАЛЮВАННЯ ПАЛИВОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ ВІД ІСКРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ

**Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., О.М. Кабанов, доцент, к.т.н.,
А.П. Кузьменко, аспірант, Е.Р. Муртазаєв, студент, ХНАДУ**

Анотація. Наведено результати розрахункової оцінки енергії запалювання паливоповітряних сумішей газових двигунів. Виконано дослідження впливу добавок водню в різних пропорціях на процес запалювання паливоповітряної суміші в газовому двигуні.

Ключові слова: газовий двигун, енергія запалювання, паливо, стиснутий природний газ, водень.

WAYS OF INCREASING AIR-FUEL MIXTURE IGNITION RELIABILITY OF GAS ENGINES FROM ELECTRIC DISCHARGE

**F. Abramchuk, Professor, Doctor of Technical Science, A. Kabanov, Associate
Professor, Candidate of Technical Science, A. Kuzmenko, graduate,
E. Murtazaev, student, KhNAHU**

Abstract. The results of the rated estimation of the air-fuel mixture ignition energy of gas engines has been shown. The research of influence of hydrogen additions in different proportion on fuel-air mixture ignition process in the gas engine has been carried out.

Key words: gas engine, ignition energy, fuel, compressed natural gas, hydrogen.

Введение

Традиционные моторные топлива, используемые на транспорте, производятся из нефти, природные ресурсы которой быстро иссякают, а её добыча непрерывно дорожает. Наряду с этой проблемой стоит проблема экологии, связанная с высоким уровнем токсичности отработавших газов транспортных двигателей. По всему миру развёрнута про-

грамма конвертирования бензиновых двигателей для работы на сжатом природном газе (СПГ). Это даёт возможность снизить уровень токсичных выбросов двигателя, увеличить ресурс деталей и существенно снизить затраты на топливо. Но этот тип двигателей имеет и ряд недостатков, одним из которых является низкая надёжность воспламенения топливовоздушной смеси, что приводит к затруднённому запуску холодного двигателя,

нестабильной работе двигателя на бедных смесях и т.д.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование высокоэнергетической системы зажигания, что влечёт за собой значительные экономические затраты. Но есть и другое решение данной проблемы – использование водорода в качестве добавки к топливовоздушной смеси, дающее возможность понизить требуемую энергию зажигания.

Анализ публикаций

Процессы, происходящие в газе при искровом разряде, были проанализированы такими советскими учёными как К. С. Вульфсон [5], Н. Н. Соболев [4] еще в первой половине XX века.

Я. Б. Зельдович и Н. Н. Симонов в 1949 году вывели теоретическую зависимость минимальной энергии, необходимой для воспламенения газообразной горючей смеси, от физических свойств смеси, продуктов горения и скорости распространения пламени [2].

Впервые использование водорода в качестве моторного топлива для подводных лодок было отмечено в конце 20-х – начале 30-х годов XX века в Германии и Англии. Также в годы Великой отечественной войны в блокадном Ленинграде проводились испытания грузовых автомобилей, работающих на водороде из отработавших аэростатов [3]. И в тех, и в других случаях учёные сталкивались с трудностями при организации рабочего процесса двигателя. Со временем, в семидесятые годы XX века, на просторах бывшего СССР, в США, Японии и других высокоразвитых странах проводились масштабные научно-исследовательские работы, связанные с использованием водорода в качестве моторного топлива [3].

Возможность использования водорода в качестве добавки к топливовоздушной смеси обсуждается уже долгое время. В НАМИ под руководством Е. В. Шатрова был создан опытный автомобиль РАФ 22034, работающий на бензоводородных смесях, который прошёл комплекс стендовых и дорожно-лабораторных испытаний [6]. В Тольяттинском государственном университете под руководством А. А. Брызгалова были проведены исследования влияния добавок водорода к метановоздушной смеси на мощностные, экологические и экономические показатели

двигателя. Опыты проводились на газовом двигателе КамАЗ-820.53-260 [7].

Цель и постановка задачи

Целью исследования является повышение надёжности воспламенения топливовоздушной смеси газовых двигателей. Для этого в работе решаются следующие задачи: разработка методики расчёта энергии зажигания смесей топлив с воздухом; выполнение расчётной оценки энергии воспламенения различных топлив; разработка рекомендаций по увеличению надёжности воспламенения топливовоздушной смеси в газовом двигателе с искровым зажиганием.

Методика расчётного исследования

Рассмотрим искровой разряд как мгновенный точечный источник тепла. За довольно малый промежуток времени электрический разряд нагревает небольшой сферический объём. Разряд затухает, и накопленная в этом начальном объёме теплота передаётся за счёт теплопроводности в окружающие concentрические слои. Температура в начальном объёме снижается, а в прилежащих слоях – увеличивается.

На рис.1 изображён характер изменения температуры в инертном газе после прекращения разряда, по истечении ряда последовательных интервалов времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$.

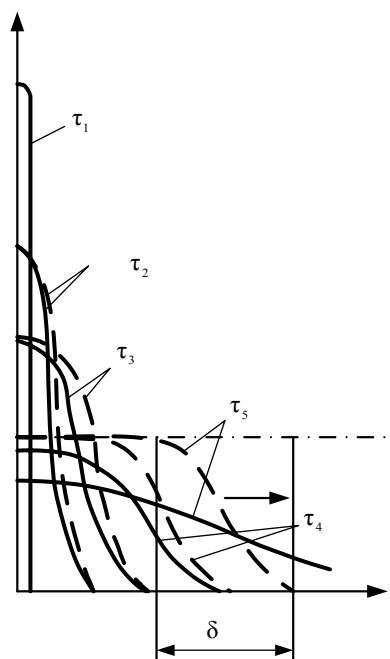


Рис. 1. Изменение температуры в зоне электрического разряда

В нашем случае газ горючий, поэтому снижение температуры замедлится, за счёт выделения тепла химических реакций горения. Когда температура в некотором шарообразном объёме снизится до значения, близкого температуре пламени $T_{пл}$ в данной смеси, причём радиус нагретой сферы $r_{кр}$ будет больше критического, дальнейшее снижение температуры прекратится, т.к. отвод тепла из зоны очага воспламенения полностью компенсируется теплотой экзотермических химических реакций в этом очаге, т.е. создадутся условия, аналогичные горению во фронте пламени [1].

Критические условия воспламенения искрой сводятся к нагреву до температуры пламени за счёт энергии разряда газовой сферы, радиус которой приблизительно втрое больший, чем толщина фронта ламинарного пламени для данной смеси при данных условиях

$$r_{кр} = 3 \cdot \delta_{пл}, \quad (1)$$

где $\delta_{пл}$ – толщина фронта ламинарного пламени.

При значениях $r > r_{кр}$ сферический фронт пламени способен к самостоятельному распространению в несгоревшей смеси, но при $r < r_{кр}$ пламя гаснет, т.к. отдача теплоты в окружающие слои смеси превышает теплоту, выделяющуюся в процессе химических реакций [2].

В свою очередь, толщина фронта ламинарного пламени пропорциональна коэффициенту теплопроводности горючей смеси и обратно пропорциональна нормальной скорости распространения пламени

$$\delta_{пл} \sim \frac{\chi}{U_n} \sim \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho \cdot U_n}, \quad (2)$$

где χ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; C_p – изобарная теплоёмкость смеси; ρ – плотность смеси; U_n – нормальная скорость распространения пламени.

Минимальная энергия, необходимая для воспламенения смеси $Q_{кр}$, при неизменном давлении должна быть обратно пропорциональна кубу нормальной скорости распространения пламени, а температуропроводности углеводородов близки к температуропроводности воздуха и мало зависят от состава и природы смеси [2].

В общем случае мы имеем выражение

$$Q_{кр} \approx \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (3 \cdot \delta)^3 \cdot C_p \cdot \rho \cdot (T_z - T_0), \quad (3)$$

где T_z – температура воспламенения смеси; T_0 – температура окружающей среды.

Подставив в это уравнение значения соответствующих параметров для тех или иных составов топливовоздушных смесей, можно сравнить значения критических тепловых мощностей для тех или иных смесей, чтобы понять – на какую величину следует изменить эти значения для получения желаемого результата.

Смесь природного газа с воздухом имеет большую температуру и энергию воспламенения, чем бензовоздушная смесь (табл. 1).

Таблица 1 Физико-химические свойства топлив

	Единицы измерения	Бензин	Сжатый природный газ	Водород
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	44	52,8	120
	МДж/м ³	192,3	38,02	10,8
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива	кг/кг	14,95	16,65	34,23
	м ³ /м ³	50,06	10,10	2,38
Молярная масса	кг/кмоль	115	17,23	2,016
Плотность при н. у.	кг/м ³	4,37	0,7455	0,09
Коэффициент теплопроводности при н. у.	Вт/(м·К)	0,014	0,0304	0,169
Коэффициент температуропроводности при н. у.	м ² /(с·10 ⁶)	10,0	19,7	24,4
Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/(кг·К)	0,322	2,071	14,189
Температура воспламенения	°С	530	660	630
Коэффициент диффузии при н. у.	м ² /(с·10 ⁶)	8	19,6	63
Октановое число	–	95...98	100...130	45...70
Характеристическая газовая постоянная	Дж/(кг·К)	72,3	482,5	4124,0

В комплексе с низкой теплопроводностью и низкой нормальной скоростью распространения пламени это способствует тому, что возникает проблема надёжного воспламенения газовой смеси при её обеднении. Одним из путей решения этой проблемы является использование высокоэнергетической системы зажигания, способной обеспечить разряд достаточной мощности. Однако если использовать водород в качестве добавок к газовой смеси, то можно увеличить теплопроводность, нормальную скорость распространения пламени, понизить энергию воспламенения газовой смеси и, таким образом, решить проблему надёжного воспламенения газовой смеси при её обеднении.

Рассмотрим случай горения смеси природного газа и воздуха при нормальных условиях (н. у.), т.е. при $T_0 = 273$ К и $p_0 = 0,1$ МПа.

Плотность смеси $\rho_{\text{смеси}}$ определим по формуле

$$\rho_{\text{смеси}} = \sum(r_i \cdot \rho_i), \quad (4)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента; r_i – объёмная доля i -го компонента.

Теплопроводность смеси $\lambda_{\text{спг+возд}}$ определим по формуле

$$\lambda_{\text{спг+возд}} = \frac{1}{\frac{r_{\text{возд}}}{\lambda_{\text{возд}}} + \frac{r_{\text{спг}}}{\lambda_{\text{спг}}}}, \quad (5)$$

где $r_{\text{возд}}$, $r_{\text{спг}}$ – массовые доли соответствующих компонентов смеси.

Скорость распространения пламени в стехиометрической смеси сжатого природного газа с воздухом при нормальных условиях равна $U_{\text{спг}} = 0,34$ м/с.

Толщина фронта ламинарного пламени определяется по формуле

$$\delta_{\text{пл}} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho \cdot U_{\text{н}}}. \quad (6)$$

Теплоёмкость смеси определяется по формуле

$$C_p = \sum(C_{pi} \cdot r_i), \quad (7)$$

где C_{pi} – изобарная теплоёмкость i -го элемента; r_i – массовая доля i -го элемента смеси.

В результате расчётов был получен результат $Q_{\text{кр}} = 0,28$ мДж, который хорошо согласуется со справочными данными [3].

Подобный расчёт проведем для бензовоздушной и водородовоздушной смесей, при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1$ (стехиометрическая смесь), $\alpha = 1,1$, $\alpha = 1,2$, $\alpha = 1,3$. При расчёте процесса горения водородовоздушной смеси в процессе теплопередачи преобладающую роль играет процесс диффузии, поэтому при расчёте толщины фронта ламинарного пламени будем руководствоваться коэффициентом диффузии (в случае углеводородных топлив мы руководствуемся коэффициентом температуропроводности). Результаты расчётов приведены в табл. 2. Свойства воздуха для н. у. при расчётах принимаем: $\rho_{\text{в}} = 1,293$ кг/м³; $\lambda_{\text{в}} = 0,0244$ Вт/(м·К); $R_{\text{в}} = 287$ Дж/(кг·К); $\chi = 18,79 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $C_p = 1004$ Дж/(кг·К).

С целью исследования влияния добавки водорода на физико-химические свойства топливовоздушной смеси и энергию зажигания с применением полученной модели выполнен расчёт энергии воспламенения смеси природного газа и воздуха с добавками водорода в количестве 2 %, 4 %, 6 %, 8 % и 10 % от объёма смеси.

Скорость распространения пламени в смеси с добавкой водорода определяется по эмпирической зависимости

$$U_i = 0,33 + 0,0189 \cdot C_i - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot C_i^2 + \dots + 6,834 \cdot 10^{-6} \cdot C_i^3, \quad (8)$$

где $C_{\text{н}}$ – содержание водорода в смеси, %.

Результаты расчётов с использованием предложенной модели представлены в табл. 3.

Влияние коэффициента избытка воздуха и добавки водорода на энергию воспламенения топливовоздушных смесей приведено на рисунках 2 и 3.

Как видно на рис. 2, для смеси природного газа и воздуха с увеличением коэффициента избытка воздуха от 1 до 1,3 энергия зажигания увеличивается в 8,6 раза. Добавка водорода к природному газу, как видно из рис. 3, уменьшает энергию воспламенения в 5,7 раза.

Таблица 2 Физико-химические свойства топливоздушных смесей

		Единицы измерения	Бензин	Сжатый природный газ	Водород
$\alpha = 1$	Объёмная доля топлива в смеси	%	1,958	9,057	29,58
	Плотность	кг/м ³	1,3677	1,245	0,9367
	Норм. скорость распростр. пламени в смеси при н.у.	м/с	0,3	0,34	1,7
	Теплота сгорания	МДж/м ³	3,78	3,43	3,19
	Коэффициент теплопроводности при н. у.	Вт/м·К	0,023314	0,02468	0,025
	Коэффициент температуропроводности при н. у.	м ² /с·10 ⁶	17,72	18,618	19,36
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/кг·К	0,9619	1,0647	1,3788
	Энергия воспламенения	мДж	0,249	0,2808	0,0207
$\alpha = 1,1$	Объёмная доля топлива в смеси	%	1,783	8,3021	27,64
	Плотность	кг/м ³	1,361	1,24905	0,9601
	Норм. скорость распростр. пламени в смеси при н.у.	м/с	0,272	0,28	1,43
	Теплота сгорания	МДж/м ³	3,42	3,12	2,98
	Коэффициент теплопроводности при н. у.	Вт/м·К	0,0234	0,02465	0,0249
	Коэффициент температуропроводности при н. у.	м ² /с·10 ⁶	17,81	18,6312	19,31
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/кг·К	0,9656	1,0595	1,3457
	Энергия воспламенения	мДж	0,3316	0,4979	0,0319
$\alpha = 1,2$	Объёмная доля топлива в смеси	%	1,637	7,6633	25,934
	Плотность	кг/м ³	1,3554	1,25239	0,98065
	Норм. скорость распростр. пламени в смеси при н.у.	м/с	0,251	0,22	1,3
	Теплота сгорания	МДж/м ³	3,13	2,89	2,79
	Коэффициент теплопроводности при н. у.	Вт/м·К	0,02348	0,0246	0,0249
	Коэффициент температуропроводности при н. у.	м ² /с·10 ⁶	17,88	18,6424	19,27
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/кг·К	0,9687	1,0552	1,318
	Энергия воспламенения	мДж	0,41034	1,0108	0,04005
$\alpha = 1,3$	Объёмная доля топлива в смеси	%	1,5133	7,1158	24,426
	Плотность	кг/м ³	1,35063	1,25526	0,9987
	Норм. скорость распростр. пламени в смеси при н.у.	м/с	0,235	0,165	1,1
	Теплота сгорания	МДж/м ³	2,90	2,89	2,83
	Коэффициент теплопроводности при н. у.	Вт/м·К	0,02354	0,02461	0,02486
	Коэффициент температуропроводности при н. у.	м ² /с·10 ⁶	17,95	18,6521	19,23
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/кг·К	0,97137	1,0515	1,2944
	Энергия воспламенения	мДж	0,48456	2,4099	0,06208

Таблица 3 Физико-химические свойства смесей сжатого природного газа с водородом (СПГ + H₂) и воздуха при различных значениях коэффициента избытка воздуха α

	Свойства смеси	Единицы измерения	ПГ + 2 % H ₂	ПГ + 4 % H ₂	ПГ + 6 % H ₂	ПГ + 8 % H ₂	ПГ + 10 % H ₂
$\alpha = 1$	Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива	кг/кг	16,86	16,85	16,84	16,83	16,82
		м ³ /м ³	9,89	9,75	9,60	9,47	9,34
	Плотность	кг/м ³	1,242	1,239	1,236	1,233	1,230
	Норм. скор. распр. плам. при н. у.	м/с	0,375	0,405	0,431	0,453	0,47
	Коэффициент теплопров. при н. у.	Вт/(м·К)	0,024680	0,024681	0,024682	0,024683	0,024684
	Коэффициент температуропров. при н.у.	м ² /с·10 ⁶	18,8121	18,8126	18,8131	18,8136	18,8141
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/(кг·К)	1,06487	1,06536	1,06585	1,066346	1,066839
	Энергия воспламенения	мДж	0,2149	0,1698	0,1409	0,12144	0,10802

Окончание табл. 3

Свойства смеси		Единицы измерения	ПГ + 2 % H ₂	ПГ + 4 % H ₂	ПГ + 6 % H ₂	ПГ + 8 % H ₂	ПГ + 10 % H ₂
$\alpha = 1,1$	Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива	кг/кг	18,5521	18,5398	18,5275	18,5153	18,5030
		м ³ /м ³	10,8752	10,7118	10,5546	10,4032	10,2574
	Плотность	кг/м ³	1,2464	1,2436	1,2409	1,2381	1,2353
	Норм. скор. распр. плам. при н. у.	м/с	0,315	0,345	0,371	0,393	0,41
	Коэффициент теплопров. при н. у.	Вт/(м·К)	0,024656	0,024657	0,024658	0,024658	0,024659
	Коэффициент температуропров. при н. у.	м ² /(с·10 ⁶)·	18,8100	18,8105	18,81097	18,8114	18,8118
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/(кг·К)	1,0597	1,0601	1,0606	1,06105	1,061505
Энергия воспламенения	мДж	0,3582	0,2713	0,2182	0,1838	0,1607	
$\alpha = 1,2$	Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива	кг/кг	20,2385	20,225	20,2114	20,1979	20,1848
		м ³ /м ³	11,859	11,6773	11,5019	11,3329	11,1702
	Плотность	кг/м ³	1,2499	1,2474	1,2448	1,2422	1,2395
	Норм. скор. распр. плам. при н. у.	м/с	0,255	0,285	0,311	0,333	0,35
	Коэффициент теплопров. при н. у.	Вт/(м·К)	0,024635	0,024636	0,024637	0,024637	0,024638
	Коэффициент температуропров. при н. у.	м ² /(с·10 ⁶)·	18,8083	18,8087	18,8091	18,8096	18,81
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/(кг·К)	1,05533	1,05576	1,05618	1,0566	1,057026
Энергия воспламенения	мДж	0,663	0,4725	0,3638	0,2969	0,2537	
$\alpha = 1,3$	Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива	кг/кг	21,925	21,91	21,896	21,8813	21,8667
		м ³ /м ³	12,844	12,64278	12,4491	12,2626	12,083
	Плотность	кг/м ³	1,2529	1,2505	1,2481	1,2457	1,2432
	Норм. скор. распр. плам. при н. у.	м/с	0,2	0,231	0,257	0,279	0,296
	Коэффициент теплопров. при н. у.	Вт/(м·К)	0,024618	0,024618	0,024619	0,02462	0,024621
	Коэффициент температуропров. при н. у.	м ² /(с·10 ⁶)·	18,8068	18,8072	18,8076	18,8079	18,8083
	Изобарная теплоёмкость при н. у.	кДж/(кг·К)	1,05161	1,052	1,05239	1,05278	1,053176
Энергия воспламенения	мДж	1,369	0,8958	0,65087	0,51	0,42314	

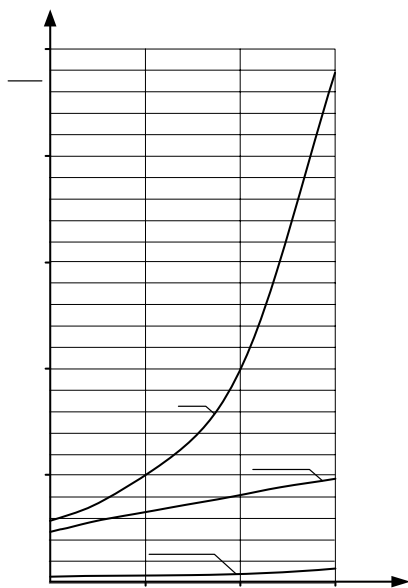


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на энергию воспламенения смесей различных топлив

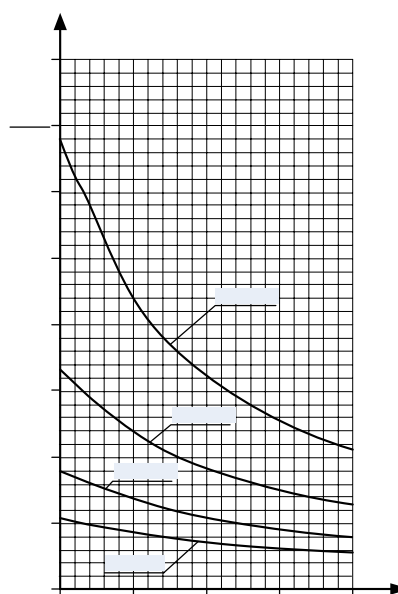


Рис. 3. Влияние добавки водовода на энергию воспламенения смеси природного газа и воздуха при различных коэффициентах избытка воздуха

Выводы

1. В работе предложена методика расчёта энергии воспламенения топливовоздушных смесей.
2. Исследованы основные топлива, которые используются в двигателе с искровым зажиганием.
3. Обеспечить надёжность воспламенения бедной смеси возможно применением добавок водорода к смеси. Добавка водорода к природному газу в количестве 10 % позволяет уменьшить энергию воспламенения в 5,7 раза.

Литература

1. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных двигателях внутреннего сгорания / А.Н. Воинов. – 2-е изд, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.
2. Зельдович Я.Б. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей / Я.Б. Зельдович, Н.Н. Симонов // Журнал физической химии. – 1949. – № 11. – С. 1361–1374.
3. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко. – К. : Наукова думка, 1984. – 143 с.
4. Соболев Н.Н. Исследование возбуждения спектра атомов в конденсированной
искре / Н. Н. Соболев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1943. – № 13. – С. 137–141.
5. Вульфсон К.С. Об импульсном разряде в инертных газах / К. С. Вульфсон // Изв. АН СССР. Серия физическая. – 1945. – № 3. – С. 239–246.
6. Шатров Е.В. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензоводородных смесях / Е. В. Шатров, А. Ю. Раменский, В. М. Кузнецов // Автомобильная промышленность. – №11. – 1979. – С. 3–5.
7. Брызгалов А.А. Добавка водорода в металловоздушную смесь газового двигателя / А.А. Брызгалов, А.П. Шайнин // мат. Междунар. науч. симпоз. «Авто-тракторостроение-2009», 17 ноября 2009 г. – М. : МГТУ «МАМИ», 2009. – С. 25–33.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по тепло-физическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

Рецензент: А. Н. Пойда, профессор, д. т. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 20 октября 2010 г.