

## ИССЛЕДОВАНИЕ СГОРАНИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Приходьков К.В.<sup>1</sup>, Бастраков А.М., Савкин А.Н.<sup>1</sup>, Авдеюк О.А.<sup>1</sup>, Крохалев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия (400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28), e-mail: oxal2@mail.ru

В статье описывается метод определения скорости сгорания водородо-воздушной смеси на модельной установке. Описан экспериментальный стенд, представлена методика подготовки водородо-воздушной смеси, проведения эксперимента и определения ламинарной скорости сгорания. Приводятся сравнение характеристик ламинарной скорости сгорания водородо-воздушной смеси со смесями других газов в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Установка была собрана в Волгоградском государственном техническом университете на кафедре теплотехники и гидравлики. Проведенные исследования показали, что водород имеет существенные перспективы как моторное топливо благодаря своим свойствам. В то же время возможным препятствием применения водорода может стать неидентичность скорости сгорания водорода при высоких значениях коэффициента избытка воздуха.

Ключевые слова: ламинарная скорость сгорания, водородо-воздушная смесь, коэффициент избытка воздуха.

## INVESTIGATION OF COMBUSTION OF HYDROGEN-AIR MIXTURES

Prihodkov K.V.<sup>1</sup>, Bastrakov A.M.<sup>1</sup>, Savkin A.N.<sup>1</sup>, Avdeuk O.A.<sup>1</sup>, Krokhaliev A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia (400005, Volgograd, Lenin Av., 28), e-mail: oxal2@mail.ru

The determining of the laminar burning velocity of gaseous fuels in experimental setup is described. The techniques of preparation of hydrogen-air mixture, the experiment and how to determine the laminar burning velocity are described. The laminar burning velocity of hydrogen-air mixture compare with some other gaseous versus air-fuel ratio has been obtained. The installation was assembled at the Volgograd State Technical University at the Department of Thermal Engineering and hydraulics. Studies have shown that hydrogen has significant promise as a motor fuel due to its properties. At the same time, the use of hydrogen possible obstacle may be non-identity of the rate of combustion of hydrogen at high excess air ratio.

Key words: laminar burning velocity, hydrogen-air mixture, air-fuel ratio.

Несмотря на некоторый спад в мировой экономике, объем автомобильного парка постоянно увеличивается [4; 8]. При этом автомобиль на сегодняшний день является не только одним из основных потребителей энергетического топлива, но и главным источником токсичных выбросов в атмосферу [6]. Актуальность задачи повышения топливной экономичности обусловлена также снижением объемов мировых запасов нефти.

Перспективным направлением снижения токсичности и повышения топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания с принудительным зажиганием является использование газовых топлив. Несомненно, что с точки зрения токсичности продуктов сгорания самым безопасным является горение водорода. В этом случае основным продуктом сгорания является водяной пар.

По своим термодинамическим свойствам водород также имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными топливами, таких как: относительно высокая диффузия, низкая температура самовоспламенения, высокая теплотворная способность. Сравнение некоторых свойств водорода с другими газами [3; 7] приведено в таблице 1.

Таблица 1

Свойство	Водород	Метан	Пропан	Бутан	Этан
Минимальная энергия зажигания, мДж	0.018	0.28	0.25	0.25	0.24
Пределы воспламенения	0.14-2.54	0.53-1.6	0.57-2.5	0.5-2.9	0.53-2.2
Теплота сгорания, Мдж/кг	120	50	47	49.5	48
Максимальная скорость сгорания, см/с	325	44.8	46.4	45	47.6

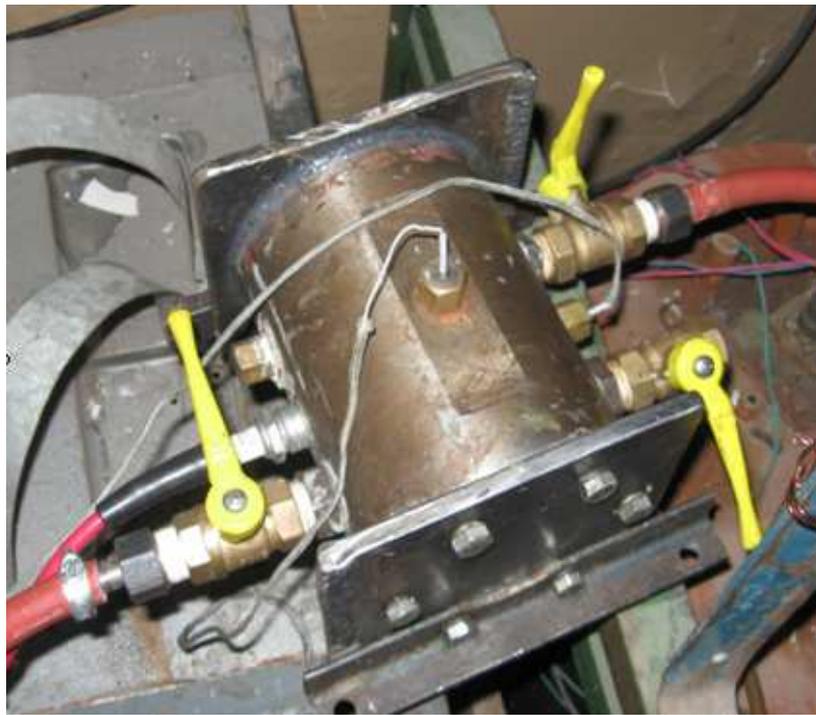
С точки зрения организации рабочего процесса в двигателе внутреннего сгорания существенную роль играет величина нормальной скорости сгорания и её статистические характеристики. От величины средней скорости сгорания зависит продолжительность процесса сгорания, температура и давление цикла и, соответственно, эффективные показатели двигателя. Случайные отклонения от среднего значения определяют межцикловую неидентичность рабочего процесса, уровень которой ограничивает предел эффективного обеднения топливовоздушной смеси. При этом именно обеднение смеси является перспективным способом снижения топливной экономичности двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Исходя из этого основной целью исследования было определение зависимости нормальной скорости сгорания от состава водородно-воздушной смеси при случайных вариациях последней.

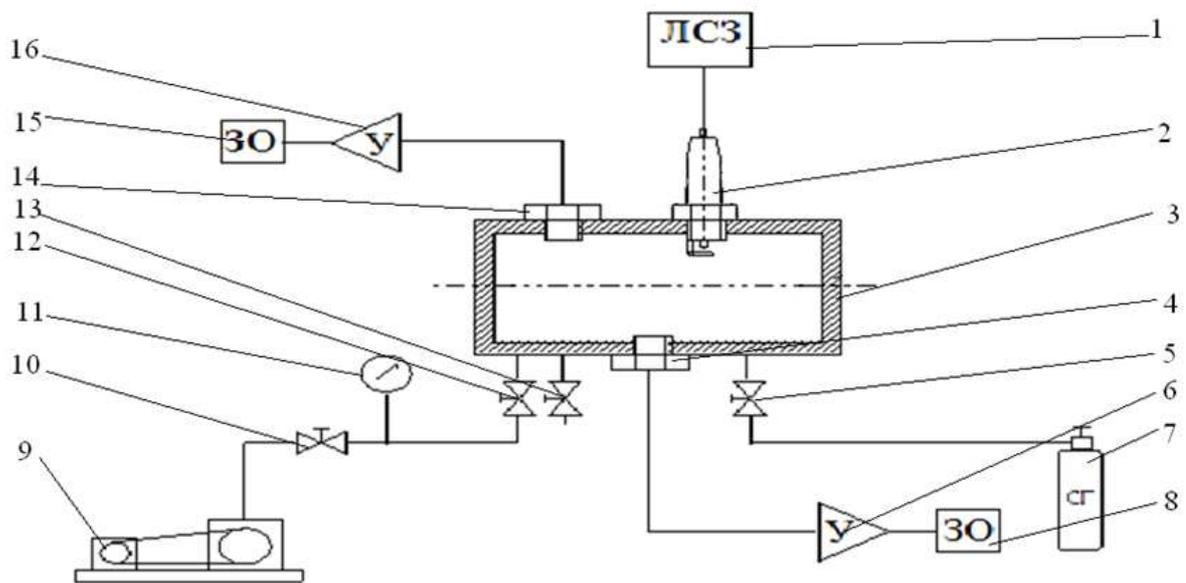
Исходя из целей исследования экспериментальное изучение сгорания водородно-воздушной смеси целесообразно было провести на модельной установке – в камере сгорания постоянного объема. Проведение эксперимента в этих условиях позволяет определять скорость сгорания в независимой последовательности циклов.

Подобная установка была собрана в Волгоградском государственном техническом университете на кафедре теплотехники и гидравлики [5]. Установка представляет собой (рис. 1) полый стальной цилиндр, заглушенный с торцов фланцами. К цилиндру через запорную арматуру подводятся шланги подачи топлива (водорода) и окислителя (воздуха), а также удаления продуктов сгорания. Камера сгорания оснащена свечой зажигания и двумя ионизационными датчиками, установленными на расстоянии 50 и 100 мм соответственно от межэлектродного зазора свечи зажигания.

Искровой разряд формируется с помощью лабораторной системы зажигания с регулируемыми параметрами.



а)



б)

Рис. 1. Установка для определения скорости сгорания топливовоздушной смеси (а – общий вид, б - схема установки):

- 1 – лабораторная система зажигания; 2 – свеча зажигания; 3 – камера сгорания постоянного объема; 4, 14 – ионизационные датчики; 5, 10, 12, 13 - вентили; 6, 16 – усилитель; 7 – баллон с газом; 8, 15 – линейные входы запоминающего осциллографа; 9 – вакуумный насос; 11 – вакуумметр

Водород приготавливался непосредственно перед экспериментом посредством генератора марки ГВ-ВЧ-12. Вырабатываемый водород соответствует требованиям ГОСТ 3022-80.

Топливная водородо-воздушная смесь заданного состава готовилась, исходя из расчетных парциальных давлений воздуха и топлива, которые определялись из закона Дальтона.

Дозирование воздуха и водорода в камеру сгорания осуществлялось посредством прекращения их подачи по достижении расчетного давления, определяемого образцовым манометром. Таким образом, коэффициент избытка воздуха в каждом опыте определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{P_0 - P_T}{P_T \cdot L_0},$$

где  $P_0$  и  $P_T$  - парциальные давления соответственно воздуха и топлива;

$L_0$  - количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания топлива, определяемое для любого углеводородного топлива из элементарного химического состава топлива. В случае, когда окислителем является воздух  $L_0 = \frac{8/3C + 8H - O}{0.232}$ , где  $C$ ,  $H$ ,  $O$  - соответственно массовые доли углерода, водорода и кислорода топлива.

Во время каждого опыта с помощью запоминающего осциллографа фиксировалось время  $\tau_b$  достижения фронтом пламени первого ионизационного датчика, что позволяет, зная расстояние  $s$  до датчика от свечи зажигания, определить видимую скорость сгорания

$$w_b = \frac{s}{\tau_b}.$$

Нормальная скорость  $w_n$  сгорания меньше видимой на величину коэффициента  $\varepsilon_g$  расширения смеси, который может быть определен из соотношения температур сгоревшей  $T_b$  и не сгоревшей  $T_u$  топливовоздушной смеси  $\varepsilon_g = \mu_0 \cdot \frac{T_b}{T_u}$ , где  $\mu_0$  - коэффициент молекулярного изменения при сгорании.

При определении коэффициента расширения принималось, что температура несгоревшей смеси равна температуре окружающего воздуха, а температура сгоревшей смеси определялась по формуле:

$$T_b = T_u + \frac{\xi \cdot Q_u}{M_u \cdot c_{vu}},$$

где  $\xi$  - коэффициент использования теплоты при сгорании;

$Q_u$  - теплота сгорания 1 киломоля топливоздушной смеси;

$M_u$  - молярная масса горючей смеси;

$c_{vu}$  - теплоемкость горючей смеси при постоянном объеме.

Необходимые термодинамические параметры для различных газов могут быть легко определены по справочной литературе, например [1; 3].

Результаты экспериментов и их сравнение приведены в таблице 2.

Таблица 2

Газ	Нормальная скорость сгорания, см/с				Максимальная при
	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 1.2$	$\alpha = 1.4$	
Водород	320	230	150	120	320 при $\alpha = 0.8$
Метан [4]	30	43.4	39.8	-	44.8 при 1.08
Пропан [5]	32	44	43.5	28	46.4 при 1.06
Бутан [4]	38	44.8	41.2	25.0	44.9 при 1.03
Этан [4]	36	44.5	47.3	37.4	47.6 при 1.14

Из таблицы хорошо видно, что скорость сгорания водорода гораздо выше скоростей сгорания других газов. По сравнению с наиболее распространенными газовыми топливами – метаном и пропаном - скорость сгорания водорода оказывается почти в 8 раз больше.

Существенное значение имеет также коэффициент избытка воздуха, при котором достигаются сопоставимые с другими газами скорости сгорания. Эту зависимость хорошо иллюстрирует рисунок 2, из которого видно, что скорости сгорания 40–50 см/с достигаются

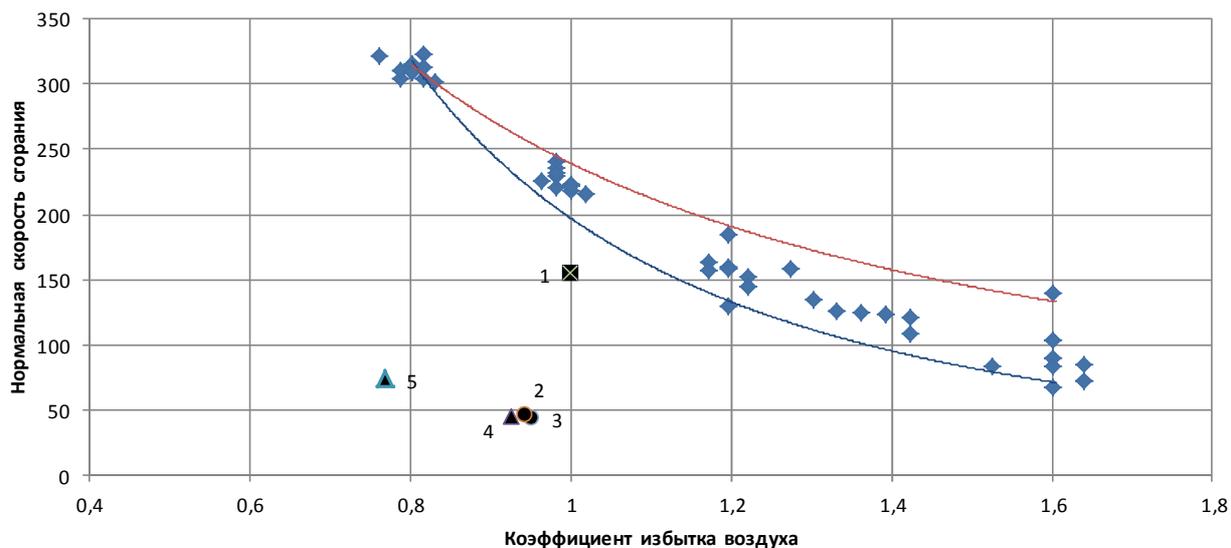


Рисунок 2. Зависимость нормальной скорости сгорания водорода и некоторых других газов от коэффициента избытка воздуха (1 - водород [3]; 2 - этан [7]; 3 - метан [7]; 4 - этилен [7]; 5 – пропан [3])

при сгорании водорода при гораздо большем обеднении смеси. Даже при максимальном обеднении, реализованном в эксперименте ( $\alpha=1.6$ ), скорость сгорания превышает максимальную скорость сгорания любого из сравниваемых газов.

Необходимо также отметить тот факт, что с обеднением смеси существенно возрастает неидентичность скорости сгорания. Как видно из рисунка 2, с увеличением коэффициента избытка воздуха от 1 до 1,6 разброс значений скоростей сгорания в пределах от минимальной до максимальной увеличивается практически в 2 раза. Так, если для стехиометрической смеси скорость сгорания изменялась от 215 до 240 см/с, то при коэффициенте избытка воздуха 1,6 скорость сгорания изменяется уже от 67 до 140 см/с.

Количественно неидентичность процесса может быть оценена также коэффициентом  $k_w$  вариации нормальной скорости сгорания:

$$k_w = \frac{\delta w_b}{\bar{w}_b},$$

где  $\delta w_b$  - среднеквадратичное отклонение скорости сгорания,  $\bar{w}_b$  - средняя скорость сгорания.

Зависимость коэффициента вариации нормальной скорости сгорания водородо-воздушной смеси от коэффициента избытка воздуха приведена в таблице 3. Из анализа полученных данных видно, что неидентичность процесса сгорания сильно зависит от состава смеси. Так, если для стехиометрической смеси коэффициент вариации скорости сгорания составляет 0.035, то с обеднением смеси до 1.6 он увеличивается почти в 6 раз и достигает значения 0.14.

Таблица 3

Газ	Коэффициент вариации нормальной скорости сгорания, см/с				
	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 1.2$	$\alpha = 1.4$	$\alpha = 1.6$
Водород	0.023	0.035	0.1	0.11	0.14

Проведенные исследования показывают, что водород имеет существенные перспективы как моторное топливо благодаря своим свойствам. В то же время возможным препятствием применения водорода может стать неидентичность скорости сгорания водорода при высоких значениях коэффициента избытка воздуха.

### Список литературы

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Наука, 1972. - 720 с.

2. Гельфанд Б.Е. Водород. Параметры горения и взрыва / Б.Е. Гельфанд, О.Е. Попов, Б.Б. Чайванов. – М. : Физматлит, 2008. - 288 с.
3. Дубовкин Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания. - М.- Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
4. Стрыгин А.В Состояние и перспективы развития автопрома стран группы БРИКС / А.В. Стрыгин, Ю. Юй // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2012. - № 3. – С. 44а-48.
5. Савкин А.Н. Экспериментальное определение ламинарной скорости сгорания водородо-воздушной смеси в камере сгорания постоянного объёма / А.М. Бастраков, К.В. Приходьков, А.В. Крохалев, О.А. Авдеюк, А.Н. Савкин // Вестник магистратуры. – 2013. - № 3. – С. 13-17.
6. Balan L.L. Transports as source of atmospherical pollution / L.L. Balan, S. Tupa // Quality - Access to Success. - 2011. – 12 (SUPPL. 2), – P. 956-61.
7. Glassman I. Combustion. - 3rd ed. - 1996. – 619 p.
8. Zachariadis T. Gasoline, diesel and climate policy implications-insights from the recent evolution of new car sales in Germany // Energy Policy. – 2013. - 54. – С. 23-32.

**Рецензенты:**

Федянов Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и гидравлика» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград.

Ревин Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «ТЭРА» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград.