

УДК 536.46:621.4

## СКОРОСТЬ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ И ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

канд. техн. наук М.С. АССАД  
(Барановичский государственный университет)

Представлена серия экспериментов по горению в закрытом сосуде – модели камеры сгорания ДВС – с двумя вариантами установки инициатора воспламенения: боковой и центральный поджиг. Получены зависимости площади поверхности пламени  $F$  и скорости теплотыделения  $dQ/dt$  исследованных водородсодержащих смесей от времени. Установлено, что с повышением начального давления в сосуде  $P_0$ , которое моделирует давление в конце такта сжатия в двигателях внутреннего сгорания, скорость теплотыделения  $dQ/dt$  изучаемых топливно-воздушных смесей возрастает, что связано с увеличением скорости нарастания давления  $dP/dt$  и количества располагаемой теплоты сгорания в исходной смеси. Показано, что увеличение добавки водорода в углеводородно-воздушной смеси приводит к ослаблению зависимости одновременно скорости теплотыделения  $dQ/dt$  и неполного использования располагаемой теплоты сгорания от начального давления (степени сжатия) в камере и обеднения смеси.

**Введение.** Пригодность любого топлива в значительной степени определяется его физико-химическими и теплотехническими свойствами. Как энергоноситель и топливо молекулярный водород существенно отличается от углеводородных топлив высокими значениями нормальной скорости сгорания, энергии воспламенения, пределов воспламенения и коэффициента диффузии [1]. Сравнительные данные по скорости сгорания пропана, моделирующего углеводородное топливо, с добавками водорода в диапазоне от 0 до 14 % по объему воздуха представлены в работе [2].

Водород может применяться в качестве основного или дополнительного топлива. Он как добавка к углеводородному топливу позволяет улучшать энерго-экологические показатели тепловых установок, в частности двигателей внутреннего сгорания, а также повышать эффективность использования углеводородных топлив с пониженным водородным показателем Н/С.

Одним из важнейших параметров при сгорании топлив является скорость теплотыделения, позволяющая оценить рабочий процесс энергоустановки с точки зрения термодинамической эффективности.

Цель данной работы – исследование факторов, оказывающих влияние на скорость теплотыделения  $dQ/dt$  при горении углеводородов и водородсодержащих топлив в модельной камере сгорания.

**Эксперимент и обсуждение его результатов.** Эксперимент проводился в камере, представляющей собой закрытый сосуд цилиндрической формы диаметром 80 и высотой 32 мм. В камере предусмотрены два варианта воспламенения смеси искрой: боковой и центральный поджиг.

Описание экспериментальной установки и методика исследований изложены в работах [2 – 4].

Исследованию подвергались смеси пропана, моделирующего традиционное углеводородное топливо, как с чистым воздухом, так и с воздухом, содержащим 2 и 4 объемных процента водорода. Кроме того, изучались смеси на основе синтез-газа (продуктов конверсии пропана) и чистого водорода с воздухом. Варианты исследованных смесей представлены в таблице 1.

Скорость теплотыделения  $dQ/dt$  может быть выражена зависимостью:

$$\frac{dQ}{dt} = u_n F \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} h_{cm}, \quad (1)$$

где  $u_n$  – нормальная скорость распространения пламени;  $F$  – площадь поверхности пламени;  $P$  – давление в момент времени, соответствующий  $u_n$  и  $F$ ;  $P_0$  – начальное давление в камере сгорания;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $h_{cm}$  – низшая теплота сгорания смеси.

Входящие в уравнение (1) параметры  $u_n$ ,  $P$  и  $P_0$  определялись экспериментально. Определение площади  $F$  поверхности пламени осуществлялось при допущениях о сферичности фронта пламени и независимости тепловых потерь от его формы. При этом объем камеры разбивался на три пространственные области, в каждой из которых определяемые параметры описывались отдельным уравнением с аргументом  $R$ , являющимся функцией времени:  $R = f(t)$  [5]. При боковом поджиге первая область ограничена сферической поверхностью радиуса  $R \leq a$ , вторая область – сферической поверхностью радиуса  $a < R \leq A/2$ , третья об-

ласть – сферической поверхностью радиуса  $R > A/2$ ; для случая центрального поджига – первая область ограничена сферической поверхностью радиуса  $R \leq a$ , вторая область – сферической поверхностью радиуса  $a < R \leq (A - a)$ , третья область – сферической поверхностью радиуса  $R > (A - a)$ .

Таблица 1

Варианты исследованных горючих смесей

Исходное горючее	Коэффициент избытка горючего $\phi$	Химический состав	Начальное давление, МПа	Номер кривой
<i>В случае бокового поджига</i>				
Пропан + 2 % водорода	0,8	$0,8C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$	0,098	1
			0,196	2
			0,491	3
Продукты конверсии пропана	0,8	$0,8(CO + 1,33H_2 + 1,88 N_2) + 1,17O_2 + 4,39N_2$	0,491	4
Пропан + 4 % водорода	1,0	$C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,54O_2 + 20,85N_2$	0,108	5
			0,491	6
Продукты конверсии пропана	1,0	$CO + 1,33H_2 + 1,17O_2 + 6,27N_2$	0,108	7
			0,491	8
Пропан	1,0	$C_3H_8 + 5O_2 + 18,81N_2$	0,108	9
			0,491	10
<i>В случае центрального поджига</i>				
Пропан + 2 % водорода	0,8	$0,8C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$	0,098	11
			0,196	12
			0,491	13
Продукты конверсии пропана	0,8	$0,8(CO + 1,33H_2 + 1,88 N_2) + 1,17O_2 + 4,39N_2$	0,098	14
			0,196	15
			0,491	16

В аналитической форме зависимость площади  $F$  поверхности пламени от радиуса  $R$  может быть представлена следующей системой уравнений [5]:

1) в случае бокового поджига

- при  $R \leq a$  (где  $a$  – величина выступа свечи зажигания в камеру сгорания):

$$F = 4\pi R^2; \quad (2)$$

- при  $a < R \leq A/2$  (где  $A$  – высота цилиндрической камеры сгорания):

$$F = 4 \int_{\alpha}^{\pi} d\varphi \int_{\sqrt{(r-a)^2 \cos^2 \varphi + r^2 - (r-a)^2}}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – полярный угол;  $\rho$  – полярный радиус;  $r$  – радиус камеры сгорания;

- при  $R > A/2$

$$F = 4 \int_{\alpha}^{\pi} d\varphi \int_{R_1}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}}, \quad (4)$$

где  $R_1$  – радиус окружности, образованной пересечением сферической поверхности пламени и торцевой стенки ( $z = a$ ) цилиндрического сосуда;

2) в случае центрального поджига:

- при  $R \leq a$ :

$$F = 4\pi R^2; \quad (5)$$

- при  $a < R \leq (A - a)$ :

$$F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_1}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}} ; \quad (6)$$

- при  $R > (A - a)$ :

$$F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_2}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}} , \quad (7)$$

где  $R_2$  – радиус окружности, образованной пересечением сферической поверхности пламени и торцевой стенки  $[z = (A - a)]$  цилиндрического сосуда.

На рисунках 1 и 2 показаны вычисленные по системам уравнений (2) – (7) зависимости поверхности пламени от времени  $t$ , полученные с привлечением экспериментальных данных по динамике распространения пламени в камере сгорания; нумерация кривых соответствует таблице 1.

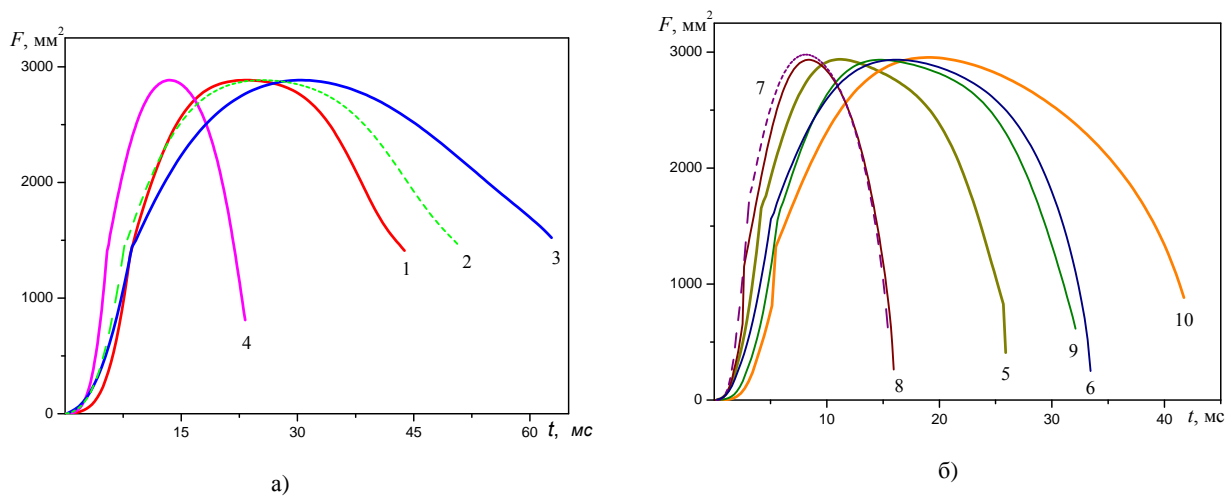


Рис. 1. Площадь поверхности пламени как функция времени в случае бокового поджига топливно-воздушных смесей: а – бедных ( $\phi = 0,8$ ); б – стехиометрических (нумерация кривых соответствует табл. 1)

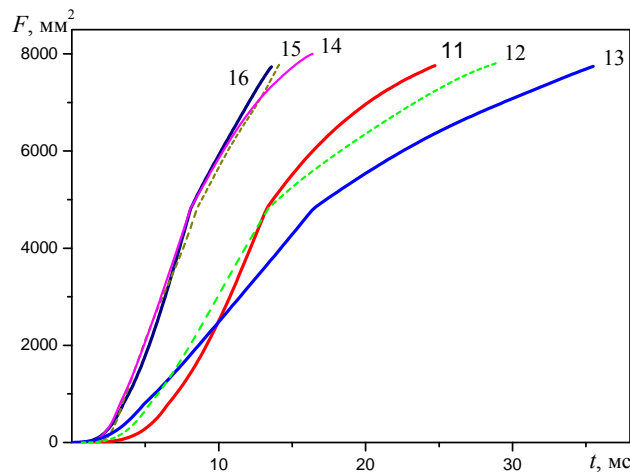


Рис. 2. Площадь поверхности пламени как функция времени в случае центрального поджига бедных ( $\phi = 0,8$ ) топливно-воздушных смесей (нумерация кривых соответствует табл. 1)

Видно, что при боковом поджиге кривые изменения поверхности пламени имеют экстремальный характер, а при центральном – поверхность пламени непрерывно возрастает, достигая максимума в конце процесса горения. Из этих рисунков также следует, что форма камеры сгорания и расположение инициато-

ра воспламенения определяют текущую величину площади фронта пламени по мере его удаления от свечи и, таким образом, обуславливают мгновенное количество смеси, принимающей участие в реакции.

Зависимости скорости тепловыделения от времени для исследованных смесей при боковом поджиге показаны на рисунке 3; при центральном поджиге – на рисунке 4. В целом динамика тепловыделения в закрытом сосуде зависит от ряда факторов, основными из которых являются: место поджига (боковой или центральный), начальное давление, коэффициент избытка горючего  $\phi$ , располагаемая теплота сгорания и концентрация молекулярного водорода в смеси.

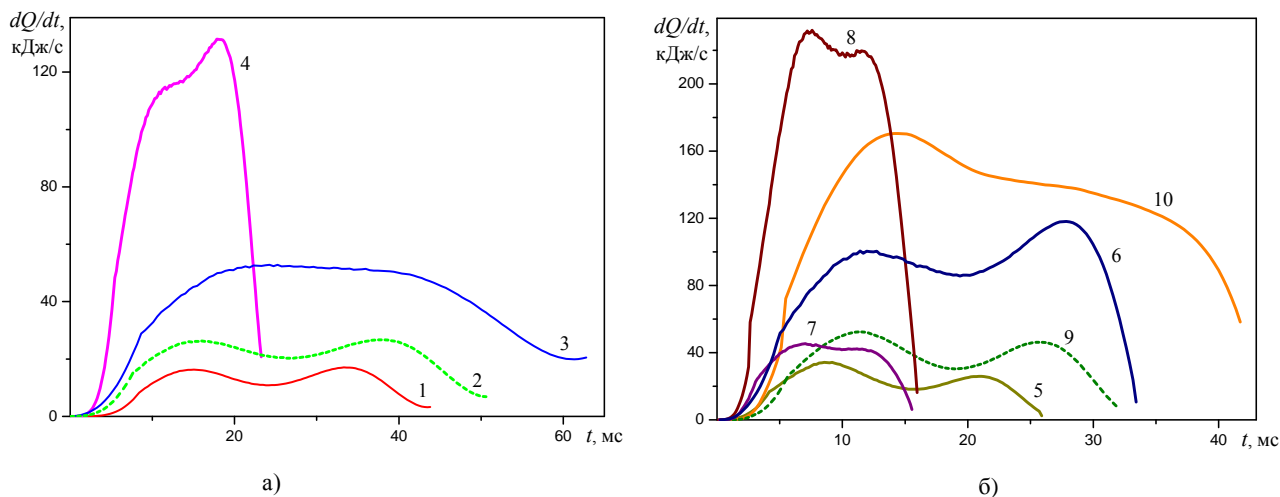


Рис. 3. Скорость тепловыделения как функция времени в случае бокового поджига топливно-воздушных смесей: а – бедных ( $\phi = 0,8$ ); б – стехиометрических (нумерация кривых соответствует таблице 1)

Из рисунков 3 и 4 видно, что скорость тепловыделения  $dQ/dt$  даже при горении бедных смесей ( $\alpha = 0,8$ ) в случае центрального поджига значительно выше, чем при горении стехиометрических смесей в случае бокового поджига. Из этого следует, что, оптимизируя форму камеры сгорания и место расположения инициатора воспламенения, можно в определенных пределах управлять динамикой тепловыделения, что может оказаться полезным при разработке камер сгорания двигателей, адаптируемых к работе на альтернативных топливах.

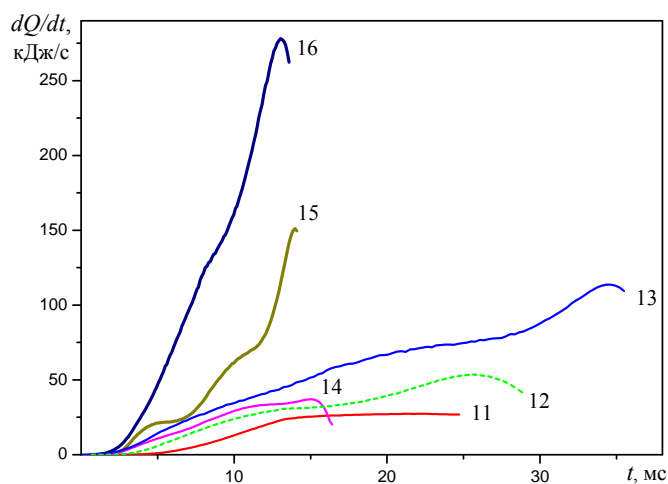


Рис. 4. Скорость тепловыделения как функция времени в случае центрального поджига бедных ( $\phi = 0,8$ ) топливно-воздушных смесей (нумерация кривых соответствует таблице 1)

С повышением начального давления в сосуде  $P_0$  (которое моделирует давление в конце такта сжатия в ДВС) скорость тепловыделения  $dQ/dt$  изучаемых топливно-воздушных смесей возрастает. При этом может сложиться впечатление об увеличении с ростом  $P_0$  скорости распространения пламени  $u$ .

Фактически возрастание  $dQ/dt$  связано с увеличением скорости нарастания давления  $dP/dt$  и количества располагаемой теплоты сгорания в исходной смеси, а скорость распространения пламени  $u$  в исследованных смесях (исключая содержащие продукты конверсии) с ростом  $P_o$ , как правило, убывает [2, 3].

Анализ рисунка 3, б показывает, что скорость тепловыделения  $dQ/dt$  при сгорании пропано-воздушной смеси (кривые 9 и 10) выше, чем для пропано-воздушной смеси, обогащенной 4 % водорода, (кривые 5, 6), что находится в хорошей корреляции с данными по теплоте сгорания  $h_u$  для этих смесей, представленными в таблице 2.

Таблица 2

Низшая теплота сгорания некоторых исследованных смесей

Исходное горючее	Коэффициент избытка горючего $\phi$	Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>		
		$P_o = 0,098$ МПа	$P_o = 0,108$ МПа	$P_o = 0,491$ МПа
Пропан	1	3,488	3,837	17,44
Пропан + 4% водорода	1	1,697	1,867	8,485
Продукты конверсии пропана	1	1,649	1,814	8,245

Однако влияние фактора ( $h_u$ ) существенно лишь при небольших добавках водорода, а при высокой его концентрации в исходной смеси оно может быть полностью подавлено за счет значительного увеличения скорости распространения пламени. Это хорошо видно из сопоставления с кривыми для пропано-воздушной смеси (9 и 10) кривых 7 и 8 для смеси на основе продуктов конверсии пропана.

При снижении располагаемой теплоты сгорания  $h_u$  более чем в 2 раза (см. табл. 2) скорость тепловыделения при начальном давлении  $P_o = 0,491$  МПа в смеси на основе синтез-газа (содержащей 14 % водорода) выше, чем у модельной смеси, на 35 %. О том, что определяющим в данном случае фактором становится скорость распространения пламени свидетельствует сопоставление кривых 6 и 8 рисунка 3, б.

При практически одинаковой располагаемой теплоте сгорания смесей и двукратном, по данным автора, превышении для смеси на основе синтез-газа наибольшей скорости распространения пламени максимальная скорость тепловыделения в указанной смеси также в два раза выше, чем в смеси с 4 % водорода.

Повышение содержания водорода дает ощутимый эффект и при горении бедных смесей. Так, увеличение концентрации водорода в бедной смеси ( $\phi = 0,8$ ) с 2 до 14 % (последнее характерно для смеси на основе продуктов конверсии) повышает скорость тепловыделения  $dQ/dt$  примерно в 2,3 раза (при  $P_o = 0,491$  МПа) в случае бокового поджига и в 1,5...2,3 раза (при  $P_o = 0,098... 0,491$  МПа) в случае центрального поджига.

Применительно к двигателям внутреннего сгорания, с повышением давления исходной смеси в камере сгорания, определяемого степенью сжатия перед воспламенением, возрастает относительное количество горючей смеси, соприкасающейся с охлаждаемыми стенками. Теплоотдача от газа к стенкам камеры сгорания ведет к сильному охлаждению горячего газа вблизи стенок, в результате чего пристеночные слои горючей смеси сгорают с уменьшенной скоростью и недогорают, увеличивая продолжительность и снижая полноту сгорания смеси. В результате коэффициент использования теплоты, представляющий собой отношение использованной теплоты к располагаемой, в точках  $P_{max}$  и  $T_{max}$  принимает значения, значительно ниже оптимальных.

Проиллюстрируем указанное неполное использование располагаемой теплоты сгорания следующим расчетом.

Рассмотрим модельную камеру (радиусом  $r = 40$  мм и высотой  $A = 32$  мм), использованную автором в экспериментах.

Предположим, что к моменту завершения распространения пламени во всем объеме сосуда несгоревшей осталась смесь в прилегающем к стенкам слое толщиной  $\delta = 0,5$  мм. Объем этой несгоревшей смеси составит

$$V_{nc} = \pi R^2 \cdot h - \pi(R - \delta)^2 (h - 2\delta) = \pi(2R\delta h - \delta^2 h + 2\delta R^2 - 4R\delta^2 + 2\delta^3) = 8,9 \text{ см}^3,$$

т.е. 5,5 % объема камеры сгорания.

При оценке относительной доли несгоревшей смеси, заключенной в пристеночном слое, необходимо учесть, что ее плотность выше, чем плотность смеси в начале горения.

Предположим, что несгоревшая смесь сжимается адиабатически от давления  $P_o$  до давления  $P_{\max}$ ; степень повышения давления  $\lambda = \frac{P_{\max}}{P_o}$  можно принять для указанных в таблице 1 смесей равной: для стехиометрических – 4; для бедных ( $\alpha = 0,8$ ) – 3. Показатель адиабаты  $\gamma = 1,3$  (эти значения характерны для ДВС). Тогда относительная доля несгоревшей смеси в пристеночном слое при указанной толщине составляет:

$$\text{- при } \alpha = 1 \quad m_{\text{нс}} = V_{\text{нс}} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0,055 \cdot 4^{1,3} = 0,16; \quad (8)$$

$$\text{- при } \alpha = 0,8 \quad m_{\text{нс}} = V_{\text{нс}} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0,055 \cdot 3^{1,3} = 0,13, \quad (9)$$

т.е. примерно 13 и 16 % массы горючей смеси. Полученную величину можно даже считать заниженной, так как маловероятно, что в непосредственной близости от стенок процесс сжатия является адиабатическим. Очевидно, что температура смеси вблизи стенок будет ниже, соответственно ее плотность – выше, чем при адиабатическом сжатии.

Указанное обстоятельство несколько снижает эффект от повышения степени сжатия, особенно при горении бедных смесей. Увеличение содержания молекулярного водорода в исходной смеси, с учетом его малого расстояния гашения (всего 0,6 мм), приводит к ослаблению зависимости неполного использования располагаемой теплоты сгорания от давления свежей смеси, причем этот эффект возрастает с обеднением смеси.

**Заключение.** Увеличение добавки водорода в углеводородно-воздушной смеси приводит к ослаблению зависимости одновременно скорости тепловыделения  $dQ/dt$  и неполного использования располагаемой теплоты сгорания от начального давления (степени сжатия) в камере и обеднения смеси.

Результаты исследования могут быть использованы при изучении процесса горения и выборе состава новых топлив, а также при конструировании камер сгорания энергетических установок, в частности двигателей внутреннего сгорания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Boer, P.C. Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines / P.C. Boer, W.J. Mclean, H.S. Noman // Intern. J. of Hydrogen Energy. – 1976. – № 2. – P. 153 – 172.
2. Горение модифицированных топлив в модели камеры сгорания ДВС / М.С. Ассад [и др.] // Тепло- и массоперенос: сб. науч. тр.; Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2005. – С. 100 – 105.
3. Combustion of hydrogen-contained fuels in the model of ice chamber / М.С. Assad [et al.] // Nonequilibrium processes in combustion and plasma based technologies: International Workshop, August 26 – 31, 2006. – P. 124 – 129.
4. Горение метановодородно-воздушных смесей в модели камеры двигателя внутреннего сгорания / М.С. Ассад [и др.] // Тепло- и массоперенос-2007. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. – С. 65 – 105.
5. Ассад, М.С. Моделирование площади поверхности пламени при горении в закрытом сосуде / М.С. Ассад, В.Н. Миронов, О.Г. Пенязьков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 1(2). – С. 60 – 65.

Поступила 28.10.2008