

ГОРЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

М. С. Ассад, В. Н. Миронов, О. Г. Пенязьков

*Лаборатория физико-химической гидродинамики
института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси*

В связи с углубляющимся мировым энергетическим кризисом, обусловленным нехваткой и постоянным удорожанием традиционных энергоресурсов, и проблемой защиты окружающей среды от продуктов сгорания органических моторных топлив весьма актуален вопрос о поиске, производстве и применении альтернативных видов горючего в энергетических установках, в том числе – в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Среди альтернативных топлив наиболее перспективным для ДВС представляется водород, интерес к которому обусловлен его высокими энергетическими и экологическими показателями, уникальными кинетическими характеристиками, и, главное, возобновляемостью сырьевых ресурсов [1-3].

Горение в цилиндре двигателя является быстропротекающим процессом и характеризуется комплексом взаимосвязанных гидродинамических, химических и теплообменных процессов, в основе которых лежит химическая реакция между горючим и окислителем.

Горению в закрытом сосуде присущи особенности, характерные для процесса сгорания в условиях цилиндра двигателя. Поэтому исследования процесса горения в закрытом сосуде (модельной камере сгорания), хотя и не относятся непосредственно к двигателям, представляют значительный интерес для понимания происходящих в них явлений.

В лаборатории ФХГ ИТМО им. А. В. Лыкова НАНБ выполнен при непосредственном участии авторов цикл работ по исследованию горения в закрытых сосудах [4-8], в частности, эксперименты с визуализацией методами скоростной фотографии процесса горения в камере сгорания с прозрачной торцевой стенкой. Исследовались смеси пропана, моделирующего традиционное углеводородное топливо, как с чистым воздухом, так и с воздухом, содержащим 2 и 4 объемных процента водорода (варианты состава топливной смеси при добавлении водорода в воздушный тракт двигателя). Кроме того, изучались смеси на основе синтез-газа (продуктов конверсии пропана) и чистого водорода с воздухом.

В большинстве случаев фронт пламени представляет собой относительно узкую область сферической формы, в которой происходит химическое превращение исходных веществ в конечные продукты сгорания.

Объем информации, полученной при визуализации распространения пламени и регистрации динамики повышения давления в камере и времени сгорания, позволил определить значения основных параметров процесса горения: скорости распространения пламени u ; скорости нарастания давления dP/dt ; а при допущениях о сферичности фронта пламени и независимости тепловых потерь от его формы – площади F поверхности пламени, объема содержащей продукты сгорания части сосуда V , массовой $m_{н.с}$ и объемной $v_{н.с}$ долей сгоревшей части смеси, массовой $(dm_{сг}/dt)$ и объемной $(dv_{сг}/dt)$ скоростей выгорания. Полученные данные позволяют судить об основных особенностях процесса горения в закрытом сосуде.

В связи с обусловленным геометрией камеры сгорания изменением при распространении пламени формы его поверхности определение некоторых из указанных

параметров осуществлялось методами математического анализа. При этом объем камеры разбивался на три пространственные области, в каждой из которых определяемые параметры описывались отдельным уравнением с аргументом R , являющимся функцией времени, $R = f(t)$. При боковом поджиге первая область ограничена сферической поверхностью радиуса $R \leq a$, вторая область – сферической поверхностью радиуса $a < R \leq A/2$, третья область – 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 $R > (A - a)$.

Таким образом в работе [7] были определены площади поверхности пламени F , а в работе [8] - объемы V пространственных областей, содержащих продукты сгорания. Полученные в работах [7, 8] окончательные выражения представлены ниже в виде следующих систем уравнений:

- Для камеры с боковым расположением инициатора воспламенения

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

$$F = 4\pi R^2; \quad (1)$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3; \quad (2)$$

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

$$F = 4 \int_{\alpha}^{\pi} d\varphi \int_0^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{(r-a)^2 \cos^2 \varphi + r^2 - (r-a)^2} \sqrt{R^2 - \rho^2}}; \quad (3)$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \left[1 - \frac{\varphi_2 R^2 - \frac{1}{2}(r-a)^2 \sin 2\varphi_2 - \varphi_2 r^2 + (r-a) \sin \varphi_2 \sqrt{(r-a)^2 \cos^2 \varphi_2 + r^2 - (r-a)^2} + r^2 \arcsin \frac{(r-a) \sin \varphi_2}{r}}{\pi R^2} \right]; \quad (4)$$

где φ – полярный угол;

ρ – полярный радиус;

r – радиус камеры сгорания;

При $R > A/2$

$$F = 4 \int_{\alpha}^{\pi} d\varphi \int_{R_1}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}}, \quad (5)$$

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

Объем V равен

для случая $R_1 \leq a$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \left[1 - \frac{\varphi_2 R^2 - \frac{1}{2}(r-a)^2 \sin 2\varphi_2 - \varphi_2 r^2 + (r-a) \sin \varphi_2 \sqrt{(r-a)^2 \cos^2 \varphi_2 + r^2 - (r-a)^2} + r^2 \arcsin \frac{(r-a) \sin \varphi_2}{r}}{\pi R^2} \right] - \frac{2}{3}\pi H^2 (R - H) \quad (6)$$

для случая $R_1 > a$

$$V = A[(\pi - \alpha_1)(R^2 - \frac{A^2}{4}) + \frac{1}{2}(r - a)^2 \sin 2\alpha_1 + \alpha_1 r^2 - (r - a) \sin \alpha_1 \sqrt{(r - a)^2 \cos^2 \alpha_1 + r^2 - (r - a)^2} - r^2 \arcsin \frac{(r - a) \sin \alpha_1}{r}] + \frac{1}{6}(\pi - \alpha)A^3 \quad (7)$$

- Для камеры с центральным расположением инициатора воспламенения

При $R \leq a$:

$$F = 4\pi R^2, \quad (8)$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3; \quad (9)$$

При $a < R \leq (A - a)$:

$$F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_1}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}}; \quad (10)$$

$$V = \pi(aR^2 + \frac{2R^3 - a^3}{3}); \quad (11)$$

При $R > (A - a)$:

$$F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{R_2}^R \frac{R\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}}, \quad (12)$$

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

$$V = \pi[AR^2 - \frac{a^3 + (A - a)^3}{3}]. \quad (13)$$

На рисунках 1 и 2 показаны зависимости поверхности пламени и соответствующего ей текущего объема продуктов сгорания, вычисленные по системам уравнений (1) – (13), от времени t , полученные с привлечением экспериментальных данных по динамике распространения пламени в камере сгорания (нумерация кривых соответствует таблицам 1 и 2). 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 инициатора воспламенения определяют текущую величину площади фронта пламени и объема продуктов сгорания по мере его удаления от свечи и, таким образом, обуславливают мгновенное количество смеси, принимающей участие в реакции.

Площадь поверхности пламени может быть использована для определения текущей величины теплоты Q , выделяющейся при сгорании к моменту времени t , а также скорости тепловыделения dQ/dt , которая выражается зависимостью

$$\frac{dQ}{dt} = u_n \cdot F \cdot (\frac{P}{P_o})^{\frac{1}{\gamma}} h_{cm}, \quad (14)$$

где u_n – нормальная скорость распространения пламени;

P – давление в момент времени, соответствующий u_n и F ;

P_o – начальное давление в камере сгорания;

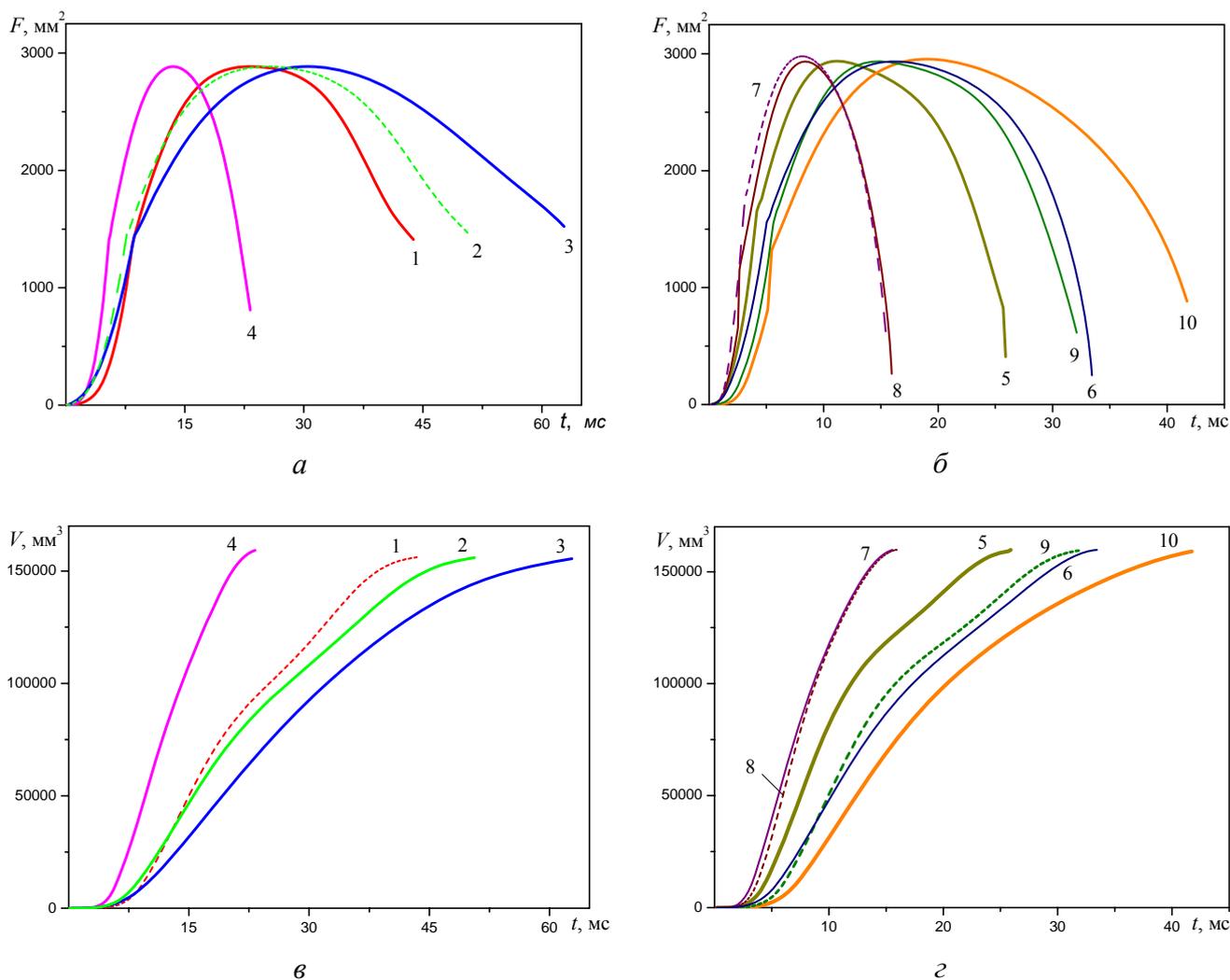


Рисунок 1 – Площадь поверхности пламени (a , b) и объем продуктов сгорания (v , z) как функция времени для бокового поджига топливно-воздушных смесей при различных коэффициентах избытка горючего: a , v – $\phi = 0,8$; b , z – $\phi = 1$ (нумерация кривых соответствует таблице 1)

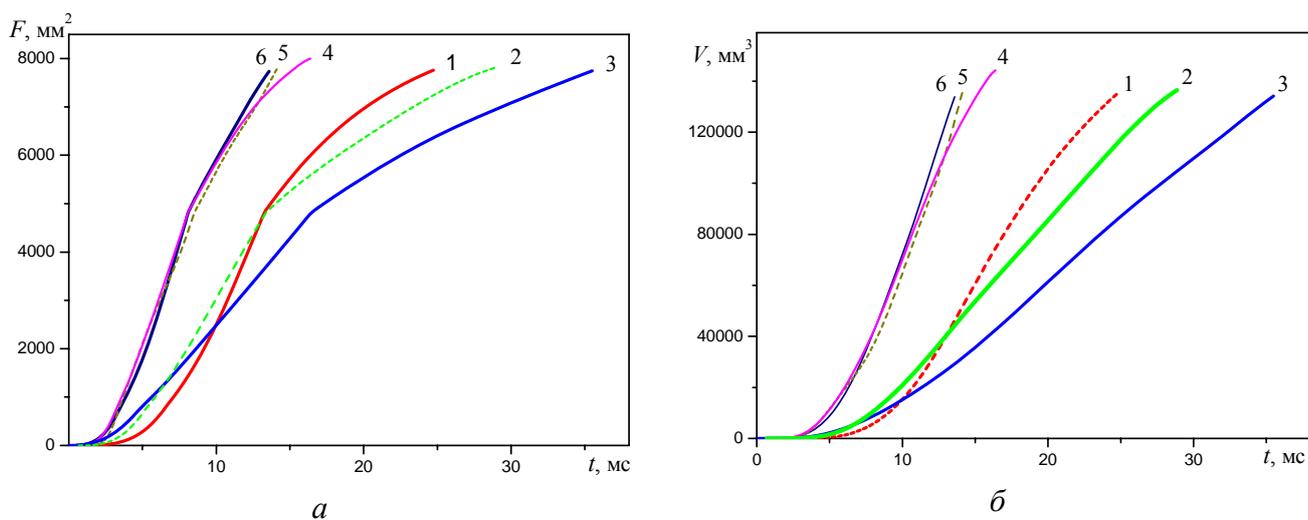


Рисунок 2 – Площадь поверхности пламени (a) и объем продуктов сгорания (b) как функция времени в случае центрального поджига бедных ($\phi = 0,8$) смесей с воздухом: 1, 2, 3 – пропана с 2 % водорода; 4, 5, 6 – продуктов конверсии (нумерация кривых соответствует таблице 2)

γ – показатель адиабаты;
 $h_{см}$ – низшая теплота сгорания смеси.

Таблица 1 – **Варианты горючих смесей, исследованных в случае бокового поджига**

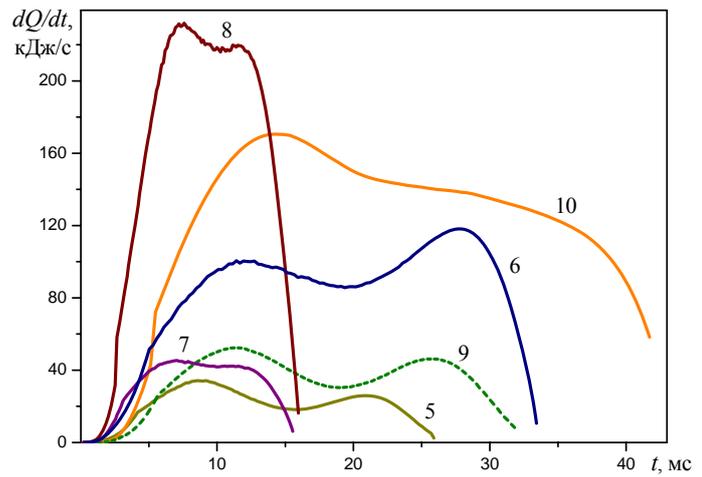
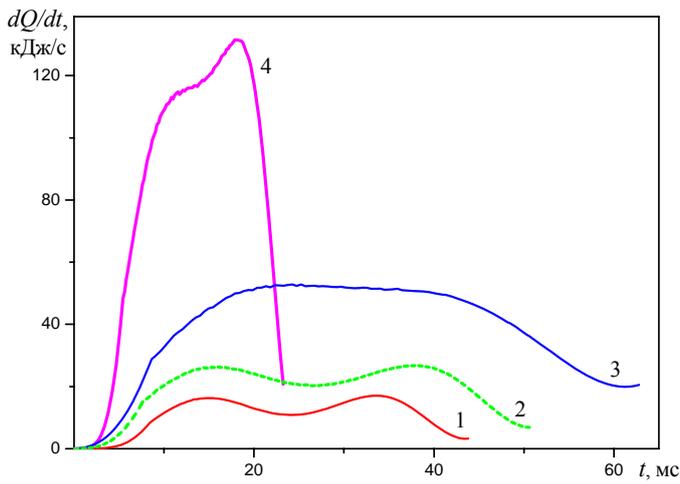
Исходное горючее	Коэффициент избытка горючего ϕ	Химический состав	Начальное давление, МПа	Номер кривой
Пропан + 2% водорода	0,8	0,8C ₃ H ₈ + 0,51H ₂ + 5,26O ₂ + 19,76N ₂	0,098	1
			0,196	2
			0,491	3
Продукты конверсии пропана	0,8	0,8(CO + 1,33H ₂ + 1,88 N ₂) + 1,17O ₂ + 4,39N ₂	0,491	4
Пропан + 4% водорода	1,0	C ₃ H 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 ₃ H ₈ + 5O ₂ + 18,81N ₂	0,108	9
			0,491	10

Таблица 2 – **Варианты горючих смесей, исследованных в случае центрального поджига**

Исходное горючее	Коэффициент избытка горючего ϕ	Химический состав	Начальное давление, МПа	Номер кривой
Пропан + 2% водорода	0,8	0,8C ₃ H 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	0,098	4
			0,196	5
			0,491	6

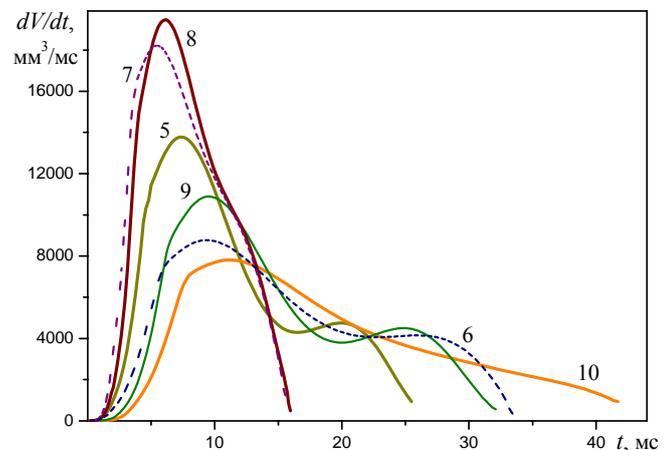
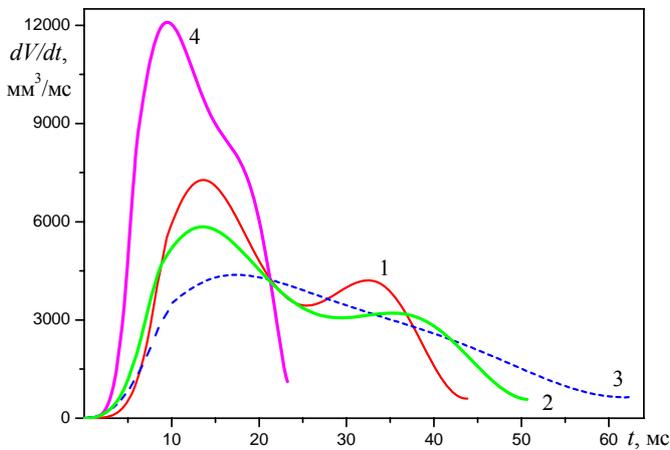
Текущий объем продуктов сгорания необходим для определения объемной скорости выгорания смеси – объемного расхода горючей смеси в единицу времени.

Характер зависимости скорости тепловыделения и объемной скорости выгорания от времени для исследованных смесей при боковом поджиге (см. таблицу 1) показан на рисунке 3; при центральном поджиге (см. таблицу 2) – на рисунке 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. Таким образом, 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.



a

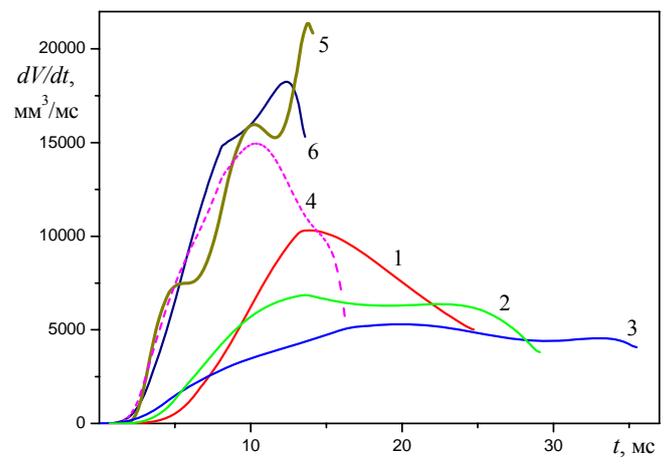
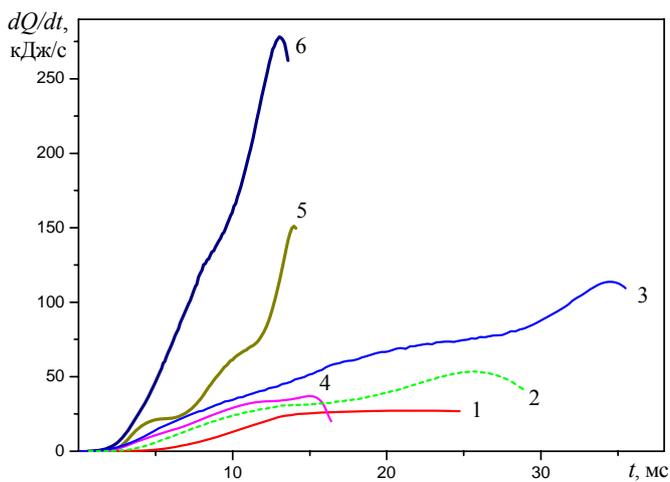
б



в

г

Рисунок 3 – Скорость тепловыделения (*a, б*) и объемная скорость выгорания (*в, г*) как функция времени в случае бокового поджига топливно-воздушных смесей: *a, в* – бедных ($\phi = 0,8$); *б, г* – стехиометрических (нумерация кривых соответствует таблице 1)



a

б

Рисунок 4 – Скорость тепловыделения (*a*) и объемная скорость выгорания (*б*) как функция времени в случае центрального поджига бедных ($\phi = 0,8$) топливно-воздушных смесей (нумерация кривых соответствует таблице 2)

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что 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, а объемная скорость выгорания dV/dt , наоборот, убывает, за исключением смеси на основе продуктов конверсии, для которой при почти пятикратном изменении P_0 восходящие ветви кривых объемной скорости выгорания dV/dt практически совпадают, причем характерно это как для стехиометрических, так и для бедных смесей и обоих вариантов поджига (кривые 7 и 8 на рисунке 3, *а* и кривые 4 – 6 на рисунке 4, *б*), что обусловлено слабой зависимостью скорости распространения пламени в смеси на основе продуктов конверсии от ее начального давления при указанных условиях.

При анализе характера кривых скорости тепловыделения для различных начальных давлений, может сложиться впечатление об увеличении с ростом P_0 скорости распространения пламени, фактически возрастание dQ/dt связано с увеличением скорости нарастания давления dP/dt и количества располагаемой теплоты сгорания в исходной смеси, а скорость распространения пламени в исследованных смесях (исключая содержащие продукты конверсии) с ростом P_0 , как правило, убывает [4, 5]. В целом, характер горения в закрытом сосуде и его параметры (температура, давление, скорость распространения пламени и т. д.) зависят от ряда факторов, основными из которых являются: место поджига (боковой или центральный), начальное давление, коэффициент избытка горючего ϕ и концентрация водорода в смеси. Повышение содержания водорода приводит к ослаблению зависимости скорости пламени от давления свежей смеси, причем этот эффект возрастает с обеднением смеси.

Скорость тепловыделения dQ/dt определяется, прежде всего, располагаемой теплотой сгорания h_u исходной смеси, о чем свидетельствует рисунок 3, *б*. Видно, что 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 для этих смесей, представленными в таблице 3. Однако влияние этого 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 (таблица 3) скорость тепловыделения при 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 авторов, превышении для смеси на основе синтез-газа максимальной 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 в области 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 $P_0 = 0,491$ МПа) в случае бокового поджига и в 1,5...2,3 раза (при $P_0 = 0,098... 0,491$ МПа) в случае центрального поджига. Существенно возрастают с увеличением концентрации водорода в смеси и значения dV/dt в обоих случаях расположения инициатора воспламенения.

Таблица 3 – Низшая теплота сгорания некоторых исследованных смесей

Исходное горючее	Коэффициент избытка горючего ϕ	Низшая теплота сгорания, МДж/м ³		
		$P_o = 0,098$ 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

Отметим, что, применительно к двигателям внутреннего сгорания, с повышением давления исходной смеси и уменьшением объема камеры сгорания, определяемых степенью сжатия перед воспламенением, возрастает относительное количество горючей смеси, соприкасающейся с охлаждаемыми стенками. Пристеночные ее слои, в которых интенсивность отдачи тепла выше, а интенсивность турбулентности ниже, 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 закрытый сосуд цилиндрической формы радиусом $r = 40$ мм и высотой $A = 32$ мм, использованный в экспериментах по горению изучаемых смесей. 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 таблицах 1 и 2 смесей равным: для стехиометрических – 4, для бедных ($\alpha = 0,8$) – 3, а показатель адиабаты $\gamma = 1,3$ (эти значения характерны для ДВС). Тогда относительная доля несгоревшей смеси в пристеночном слое толщиной, например, 0,5 мм составляет:

$$\text{при } \alpha = 1 \quad m_{nc} = V_{nc} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0,055 \cdot 4^{\frac{1}{1,3}} = 0,16 ; \quad (15)$$

$$\text{при } \alpha = 0,8 \quad m_{nc} = V_{nc} \cdot \left(\frac{P_{\max}}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0,055 \cdot 3^{\frac{1}{1,3}} = 0,13 , \quad (16)$$

т.е. примерно 13 и 16 % массы заряда. 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 в области бедных смесей, например, при работе двигателя на углеводородах в условиях городского цикла.

Обеднение горючей смеси и (с учетом последнего замечания) повышение начального давления P_o (в условиях двигателей внутреннего сгорания - путем увеличения степени

сжатия, что, несомненно, положительно влияет на термический КПД цикла) отрицательно сказываются на динамике тепловыделения, определяемого количеством свежей смеси и величиной располагаемой теплоты сгорания в ней, особенно в пристеночных слоях сосуда. Это приводит к тому, что в отсутствие специальных мероприятий, способствующих более быстрому завершению сгорания, с увеличением влияния указанных факторов замедляется динамика тепловыделения и возрастает неполное использование располагаемой теплоты сгорания.

С учетом результатов данного исследования, к числу мероприятий, компенсирующих отрицательное влияние указанных выше факторов при горении в закрытом сосуде, например, в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, можно отнести:

- использование водорода в качестве активизирующей горение добавки, повышение концентрации которого ослабляет зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от данных факторов;

- расположение инициатора воспламенения так, чтобы путь пламени, определяемый геометрией сосуда, до наиболее удаленной точки камеры сгорания оказался минимальным. В случае камеры цилиндрической формы оптимальным является расположение свечи посередине ее торцевой стенки. Боковое расположение свечи, которое часто оказывается приемлемым по конструктивным соображениям, удлиняет путь пламени и увеличивает время сгорания в 1,4...1,6 раза [8].

Кроме того, к числу рекомендуемых мероприятий можно отнести создание в сосуде интенсивного турбулентного (вихревого) движения рабочего заряда за счет тангенциального вдува смеси.

В заключение отметим, что совокупность изученных в работе параметров определяет мощность, экономичность и надежность энергетической установки. Полученные результаты могут быть использованы при выборе состава альтернативных моторных топлив и конструировании камер сгорания энергетических установок.

Работа выполнена в рамках ГППНИ «Водород» по заданиям «Водород 14» и «Водород 24».

Список литературы

- [1] 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 // *J. of Power Sources*. 2001. Vol. 96. Pp. 168-172.
- [2] Berry G. D., Pasternak A. D., Rambach G. D., Smith J. R., and Schock R. N. Hydrogen as a future transportation fuel // *Energy*. 1996. Vol. 21, No. 4. Pp. 289-303.
- [3] Andrea T. D., P. F. Henshaw P. F., Ting D. S.-K. The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2004. Vol. 29. Pp. 1541-1552.
- [4] Ассад М. С., Лещевич В. В., Миронов В. Н., Пенязьков О. Г., Севрук К. Л. Горение модифицированных топлив в модели камеры сгорания ДВС / Сборник научных трудов «Тепло- и массоперенос» Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН РБ.- Минск, 2005. - С. 100-105.
- [5] Assad M. C., Leshchevich V. V., Mironov V. N., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Skilond A. V. Combustion of hydrogen-contained fuels in the model of ice chamber // *International Workshop "Nonequilibrium processes in combustion and plasma based technologies"*. – August 26-31. 2006. Pp. 124-129.
- [6] Ассад М.С., Лещевич В. В., Миронов В. Н., Пенязьков О. Г., Скилондъ А. В. Горение метановодородно-воздушных смесей в модели камеры двигателя внутреннего сгорания // *Тепло- и массоперенос–2007*. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. С. 65–105.
- [7] Ассад М. С., Миронов В. Н., Пенязьков О. Г. Моделирование площади поверхности пламени при горении в закрытом сосуде // *Механика машин, механизмов и материалов*, № 1 (2). – 2008. С. 60 – 65.
- [8] Ассад М. С. Альтернативные моторные топлива: тенденции развития, феноменологические аспекты горения. – Барановичи: БарГУ, 2008.