

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ**

**Канд. техн. наук АССАД М. С.**

*Барановичский государственный университет*

Проблему использования альтернативных видов топлива в двигателях внутреннего сгорания целесообразно рассматривать системно, т. е. с максимальным охватом и учетом взаимосвязей и взаимозависимостей различных влияющих факторов. Ключевым в данной проблеме является вопрос оптимальной организации процесса превращения химической энергии в тепловую и далее в механическую, ответить на который невозможно без всестороннего и глубокого изучения процесса горения топлива в цилиндре (закрытом сосуде) двигателя.

Исследование детальных физико-химических механизмов, определяющих процесс горения в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, представляет значительные трудности даже на сегодняшнем уровне знаний. Это связано с тем, что горение в закрытом сосуде – процесс быстропротекающий и характеризуется комплексом сложных взаимодействующих физико-химических процессов, в основе которого лежит химическая реакция между горючим и окислителем.

Одним из действенных методов изучения быстропротекающих процессов, сопровождающихся световыми явлениями, продолжительность которых измеряется малыми промежутками времени, является скоростная кино- или фоторегистрация.

Визуализация методом скоростной фоторегистрации дает информацию в основном о качественной стороне протекающих в закрытом сосуде (цилиндре двигателя) процессов, что позволяет глубоко исследовать такой сложный процесс, как горение. Преимущество этого метода заключается в возможности непосредственной регистрации развития пламени в камере сгорания и получения, таким образом, наглядного, удобного для зрительного восприятия представления о развитии процесса горения.

Для осуществления визуализации процесса горения был оборудован экспериментальный стенд, состоящий из следующих основных частей [1]:

- 1) модельной камеры сгорания, представляющей собой закрытый сосуд цилиндрической формы постоянного объема внутренним диаметром 80 мм и высотой 32 мм, один из торцов которого выполнен из кварцевого стекла;
- 2) электродвигателя с вращающимся диском, имеющим прорези для съемки определенных фрагментов процесса горения;
- 3) генератора временных интервалов;
- 4) формирователя импульса зажигания;
- 5) электромеханического затвора;
- 6) цифрового фотоаппарата, представляющего собой многофункциональную однообъективную камеру с высокими чувствительностью и разрешением (6,3 млн эффективных пикселей);

7) цифрового осциллографа, представляющего собой измерительный прибор для исследований однократных и периодических электрических сигналов в диапазоне частот от 0 до 200 МГц путем их регистрации в цифровой памяти и отображения на экране компьютера и цифрового измерения амплитудных и временных параметров.

Воспламенение смеси производилось свечой зажигания, установленной в цилиндрическую стенку камеры сгорания. Через прозрачную торцовую стенку, вскрывающую для обзора 100 % площади камеры сгорания в плане, возможно наблюдать визуально или снимать на цифровой накопитель при помощи скоростного фотоаппарата через прорези вращающегося диска и электромеханический затвор картину процесса горения. Специальная электронная система обеспечивала синхронизацию работы затвора фотоаппарата с моментом подачи искры для зажигания смеси, что позволяло производить фотографирование различных стадий распространения пламени в камере сгорания. Источником света при визуализации процесса горения является лучистая энергия (свечение) самого пламени.

Одновременно с проведением скоростного фотографирования процесса горения регистрировались два параметра: развиваемое в процессе давление и время (продолжительность) горения смеси от момента поджига до момента достижения максимального давления. Система регистрации этих параметров включала датчик давления, вмонтированный в цилиндрическую стенку камеры (напротив свечи) и цифровой осциллограф с программным обеспечением, с помощью которого записывались сигналы датчика.

Визуализация процесса горения предполагала производить мгновенные снимки положения фронта пламени. Задержка времени между подачей управляющего сигнала на поджиг смеси в камере сгорания и моментом прохождения луча через прорези вращающегося диска на объектив цифрового фотоаппарата устанавливалась с помощью генератора временных интервалов, который запускался при поступлении электрического импульса от управляющего светодиода. Импульс от управляющего светодиода использовался также для синхронизации момента поджига и запуска цифрового осциллографа, который записывал сигналы с датчика измеряемого в камере сгорания давления. По полученным осциллограммам определялась длительность процесса горения до момента съемки.

Состав исследованных в ходе экспериментов смесей приведен в табл. 1. Пропан рассматривался как базисное горючее, к которому применялись малые добавки водорода – 2 и 4 % по объему. Кроме того, исследовалась смесь продуктов конверсии пропана (синтез-газа).

В качестве иллюстрации на рис. 1 представлено развитие горения пламени пропано-воздушной смеси, на рис. 2 – смеси продуктов конверсии с воздухом. Видно, что горение рассмотренных смесей имеет ламинарный характер и представляет собой перемещение фронта пламени в последовательных ламинах (слоях) свежей смеси, которые нагреваются за счет теплоты, выделяющейся при сгорании предшествующих ламин; теплота при этом передается как теплопроводностью, так и диффузионным обменом (проникновением нагретых молекул сгоревшей части смеси в свежую часть, а молекулы свежей смеси – в зону горения).

Таблица 1

Топливо-воздушные смеси, использованные в экспериментах

Топливо-воздушная смесь	Коэффициент избытка горючего $\Phi$	Химический состав смеси
Пропан + воздух (смесь 1)	1 (1)	$C_3H_8 + 5O_2 + 18,81N_2$
Пропан + 2 % водорода + воздух (смесь 2)	1 (1)	$C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$
Пропан + 4 % водорода + воздух (смесь 3)	1 (1)	$C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,54O_2 + 20,85N_2$
Продукты конверсии пропана + воздух (смесь 4)	1 (1)	$CO + 1,33H_2 + 1,17O_2 + 6,27N_2$
Пропан + воздух (смесь 1а)	0,8 (1,25)	$0,8C_3H_8 + 5O_2 + 18,81N_2$
Пропан + 2 % водорода + воздух (смесь 2а)	0,8 (1,25)	$0,8C_3H_8 + 0,51H_2 + 5,26O_2 + 19,76N_2$
Пропан + 4 % водорода + воздух (смесь 3а)	0,8 (1,25)	$0,8C_3H_8 + 1,1H_2 + 5,54O_2 + 20,85N_2$
Продукты конверсии пропана + воздух (смесь 4а)	0,8 (1,25)	$0,8(CO + 1,33H_2 + 1,88 N_2) + 1,17O_2 + 6,27N_2$

**Примечание.** В скобках указан коэффициент избытка окислителя (воздуха)  $\alpha$ .

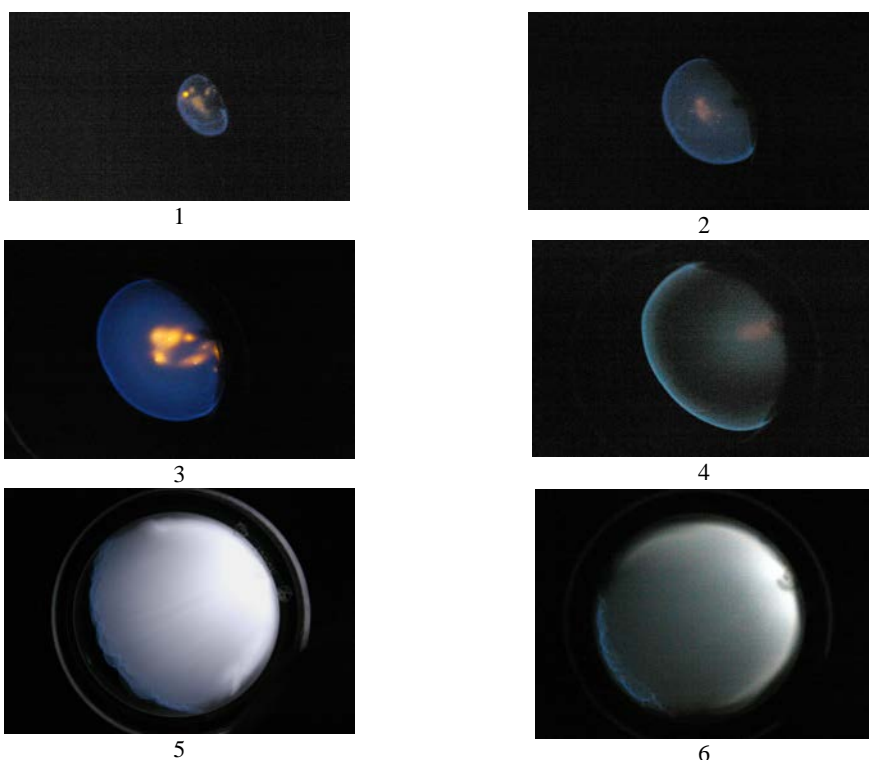


Рис. 1. Серия последовательных фотографий фронта пламени на разных стадиях горения пропано-воздушной смеси в камере с боковым поджигом ( $\Phi = 1$ )

Фронт пламени представляет собой относительно узкую полосу, в которой происходит быстрое повышение температуры горючей смеси и химическое превращение исходных веществ в конечные продукты сгорания. Ширина этой полосы относительно невелика.

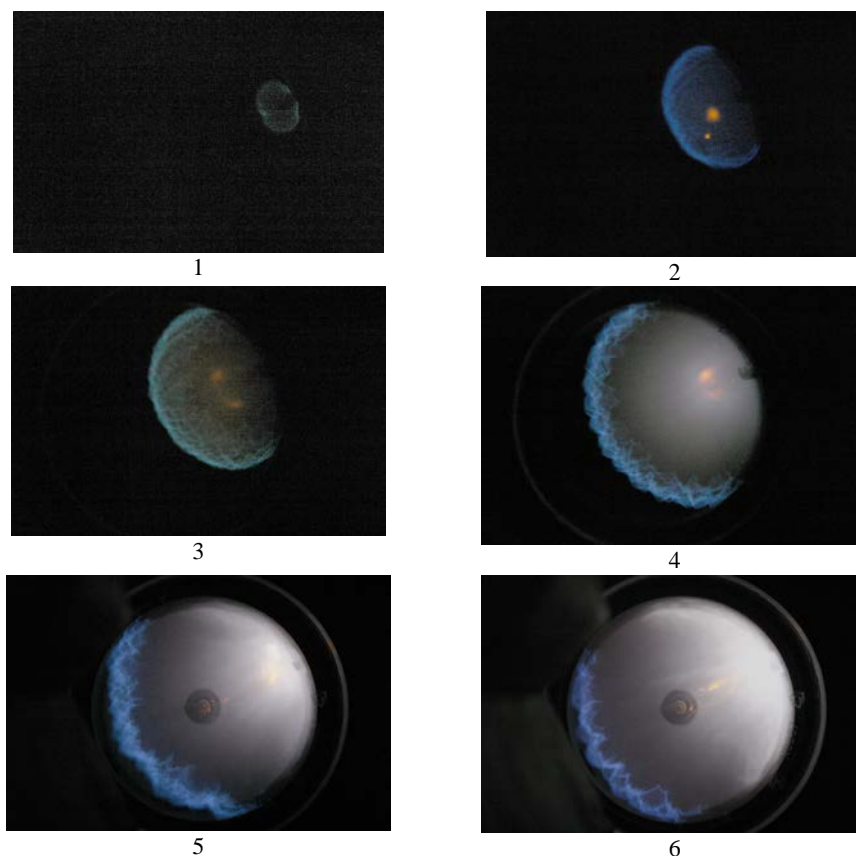


Рис. 2. Серия последовательных фотографий фронта пламени на разных стадиях горения смеси продуктов конверсии пропана с воздухом в камере с боковым поджигом ( $\Phi = 1$ )

При визуальном наблюдении процесса горения через прозрачную торцовую стенку камеры сгорания видно свечение пламени, яркость и цвет которого зависят от присутствия в нем мельчайших частиц сажи (углерода), образующихся в результате термического разложения (крекинга) углеводородов, содержащихся в горючем.

По окраске различают два вида пламени: голубое (синее) и желтое (светящееся).

Голубое пламя характеризуется преимущественно чисто газовым излучением трехатомных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). Интенсивность излучения относительно невелика.

Желтое (светящееся) пламя характеризуется интенсивным излучением, состоящим из газового излучения трехатомных газов и взвешенных частиц сажи (углерода) в пламени, поэтому это пламя отличается более высокой степенью черноты по сравнению с голубым пламенем.

Анализ фотоснимков, снятых при горении различных смесей в одинаковых условиях, показывает существенные отличия в характере окисления и неидентичность картин пламени для одинаковых моментов времени. Картины отличаются цветом и яркостью свечения, очертаниями фронта пламени, пройденным пламенем расстоянием. Так, пламя пропано-воздушной смеси имеет ярко-голубой (ярко-синий) цвет. Увеличение концентрации водорода в смеси приводит к уменьшению яркости, что объясняет-

ся уменьшением содержания частиц сажи (углерода) и уникальностью окисления каждой смеси.

Фронт пламени пропано-воздушной смеси стехиометрического состава в большей части процесса – гладкий, тонкий, и лишь при приближении к стенкам камеры пламя теряет гладкую форму и приобретает неустойчивую волнистую поверхность (рис. 1). Добавление водорода в объеме до 4 % практически не приводит к заметным невооруженным глазом изменениям формы фронта пламени. Несколько иной характер имеет процесс горения синтез-газа (продуктов конверсии пропана), неустойчивость фронта пламени которого наблюдается значительно раньше, чем у пропана (рис. 2). Фронт пламени этой смеси имеет рельефную (изломанную) поверхность с колебаниями, амплитуда и период которых возрастают по мере отдаления пламени от источника зажигания. При относительно малых размерах фронта пламени, за исключением примыкающей к свече зажигания зоны, вся зона окисления практически пронизана многократно пересекающимися линиями, образующими пространственную ячеистую (сетчатую) структуру, что объясняется, по-видимому, гидродинамической неустойчивостью пламени, появлением возмущений на фронте и возникновением внутри области продуктов сгорания волн сжатия. По мере увеличения фронта пламени ширина зоны с сетчатой структурой постепенно уменьшается и в завершающей фазе процесса горения поверхность фронта пламени приобретает пространственную волнистую форму с резким возрастанием амплитуды образующихся волн.

На всех фотоснимках внутри области сгоревшей части, ограниченной снаружи фронтом пламени, наблюдается практически однородное пространство с более ярким свечением в зоне, примыкающей к источнику воспламенения, так называемым вторичным свечением.

Существовали две альтернативные точки зрения на природу вторичного свечения: одна, выдвинутая в первых исследованиях этого явления, связывает вторичное свечение с возобновлением химического процесса в продуктах сгорания и догоранием несгоревшей части горючего вещества после завершения процесса распространения пламени; другая, принадлежащая Льюису и Эльбе [2], трактует данное явление как следствие температурного градиента, вызванного повышением температуры в части заряда, сгоревшего в первую очередь. В обоснование термической трактовки вторичного свечения приводят тот факт, что вторичное свечение не наблюдается при сгорании при постоянном давлении, т. е. там, где не возникает температурный градиент в продуктах сгорания. При постоянном объеме (в закрытом сосуде) вторичное свечение возникает в момент, когда температура начинает быстрее расти вследствие сжатия [3].

Сегодня вторичное свечение рассматривается как термическое излучение и имеет однозначную трактовку, связанную с возникновением температурного градиента, или Махе-эффекта [4].

Используя экспериментальные данные по давлению  $p$ , можно установить закономерность выгорания топлива и тепловыделения в закрытом сосуде – модельной камере сгорания, следующим образом.

Из уравнения состояния газа в интегральной форме и закона сохранения энергии с учетом допущений об отсутствии теплообмена с окружаю-

шей средой, а также равенстве и постоянстве теплоемкостей свежей смеси и продуктов сгорания по всему объему сосуда имеем

$$p \int_0^{V_0} dV = R \int_M T dM, \quad (1)$$

где  $V_0$  – объем сосуда;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура в сосуде;  $M$  – полная масса газа в сосуде (символ  $M$  у интеграла означает, что интегрирование ведется по всей массе),

$$\text{и} \quad h_u + U_0 = h_u (1 - m_{\text{п.с}}) + U, \quad (2)$$

где  $h_u$  – теплота сгорания всей заключенной в закрытом сосуде свежей смеси;  $U_0$  – внутренняя энергия свежей смеси перед сгоранием;  $m_{\text{п.с}}$  – массовая доля сгоревшей смеси (продуктов сгорания) в некоторый данный момент горения, которому соответствует давление  $p$ ;  $U$  – внутренняя энергия продуктов сгорания (сгоревшей смеси).

В (1) давление в сосуде можно выразить через внутреннюю энергию всего заключенного в нем газа,  $U = \int_M c_v T dM$  (здесь  $c_v = \text{const}$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме). Тогда

$$p = \frac{RU}{V_0 c_v}. \quad (3)$$

После подстановки и преобразований получим

$$p = \frac{RU_0}{V_0 c_v} + \frac{R m_{\text{п.с}} h_u}{V_0 c_v}. \quad (4)$$

В правой части (4) первое слагаемое представляет собой начальное давление  $p_0$ , а второе – произведение массовой доли сгоревшей смеси и прироста давления в сосуде, т. е.

$$p = p_0 + (p_{\text{max}} - p_0) m_{\text{п.с}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) свидетельствует о том, что давление  $p$  линейно зависит от доли сгоревшей смеси  $m_{\text{п.с}}$  независимо от того, как распространяется пламя по сосуду. Из этого же уравнения можно выразить долю  $m_{\text{п.с}}$  сгоревшей смеси (продуктов сгорания) в любой момент как функцию давления  $p$

$$m_{\text{п.с}} = \frac{p - p_0}{p_{\text{max}} - p_0}, \quad (6)$$

которая показывает, что  $m_{\text{п.с}}$  равна относительному увеличению давления в сосуде.

Подставляя экспериментальные значения начального  $p_0$ , текущего  $p$  и максимального  $p_{\text{max}}$  давлений в уравнение (6), можно определить долю сгоревшей части смеси, зависимость которой от времени горения  $\tau$  при



## ВЫВОД

Настоящее исследование лишь уточняет общую картину протекания процесса сгорания в закрытом сосуде. Полученный объем информации из-за сложности самого процесса горения не дает возможности активного воздействия на развитие отдельных стадий процесса в желаемом направлении. Однако можно полагать, что применение скоростного фотографирования в совокупности с другими методами исследований приведет в дальнейшем к возможности управления этим сложным и весьма важным процессом – горением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г о р е н и е модифицированных топлив в модели камеры сгорания ДВС / М. С. Ассад [и др.] // Тепло- и массообмен: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2005. – С. 100–105.
2. Л ь ю и с, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
3. С о к о л и к, А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах / А. С. Соколик. – М.: АН СССР, 1960. – 428 с.
4. М а т е м а т и ч е с к а я теория горения и взрыва / Б. Я. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

Представлена кафедрой  
физико-математических дисциплин

Поступила 10.10.2007

УДК 543.271

## О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА ТВЕРДОЭЛЕКТРОЛИТНЫМИ СЕНСОРАМИ

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ В. И., асп. МАЛАФЕЙ В. Г.

*Белорусский национальный технический университет*

Работа твердоэлектродного сенсора основана на использовании свойств высокотемпературной гальванической ячейки, обладающей кислородной проводимостью. Сенсор состоит из твердого электролита – двуокиси циркония, стабилизированного окисью итрия, находящегося между двумя металлическими электродами (платина или редкоземельные элементы), которые омываются газовыми смесями с различными парциальными давлениями кислорода. Один электрод (отрицательный) омывается эталонным газом (атмосферным воздухом), а второй электрод (положительный) – потоком дымовых газов. Помещенный в дымовые газы твердоэлектродный сенсор развивает ЭДС зависящую от температуры газов и парциального давления содержащегося в них кислорода. Кислородная проводимость сенсора сохраняется в диапазоне температур 600–1000 °С. Развиваемая сенсором ЭДС подчиняется термодинамическому уравнению Нернста,