

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 быстротекущий и характеризуется комплексом сложных взаимодействующих физико-химических процессов, в основе которого лежит химическая реакция между горючим и окислителем.

Одним из действенных методов изучения быстротекущих 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 Φ	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) α .

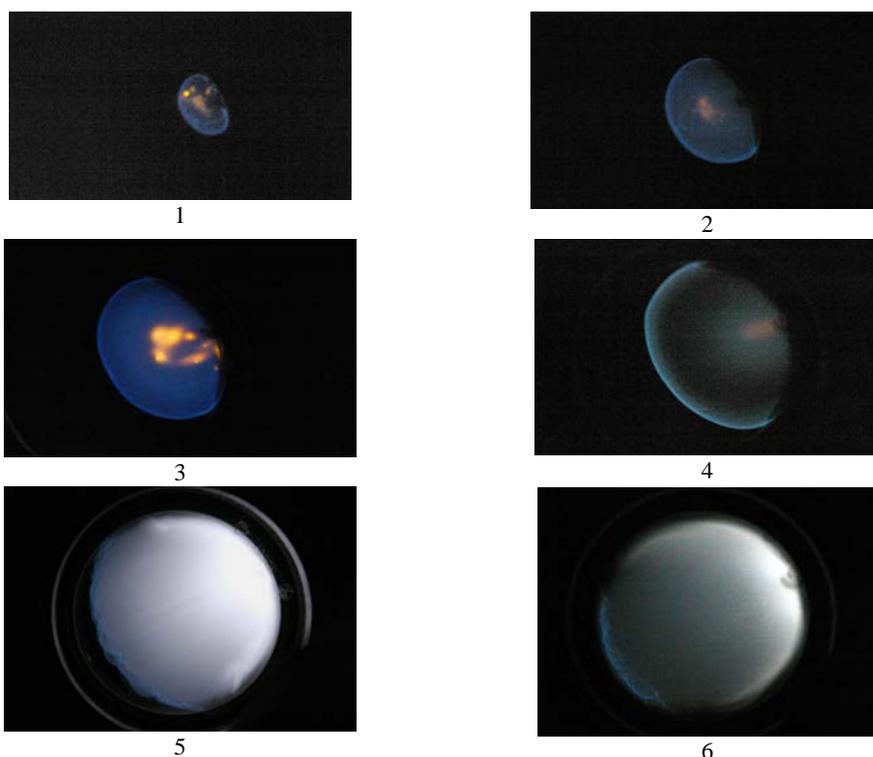


Рис. 1. Серия последовательных фотографий фронта пламени на разных стадиях горения пропано-воздушной смеси в камере с боковым поджигом ($\Phi = 1$)

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.

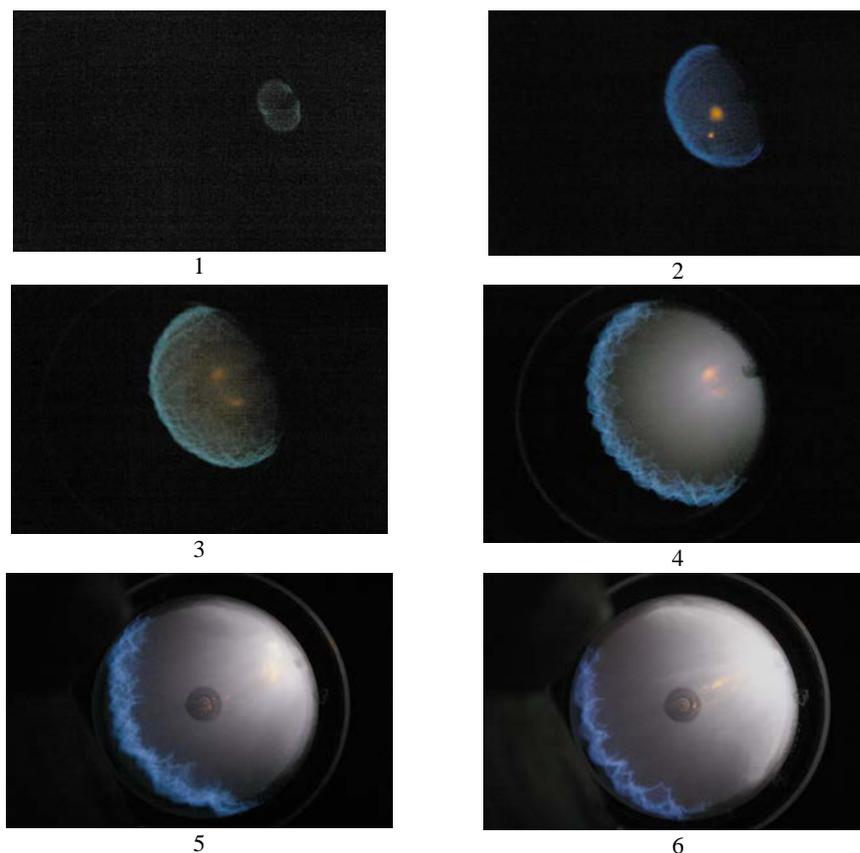


Рис. 2. Серия последовательных фотографий фронта пламени на разных стадиях горения смеси продуктов конверсии пропана с воздухом в камере с боковым поджигом ($\Phi = 1$)

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 (CO_2 и H_2O). 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_{max} давлений в уравнение (6), можно определить долю сгоревшей части смеси, зависимость которой от времени горения τ при

$\Phi = 1$ ($\alpha = 1$) и $\Phi = 0,8$ ($\alpha = 1,25$) показана на рис. 3. Кривые на этом рисунке представляют собой закон выгорания каждой смеси в графической форме. Видно, что скорость выгорания (тепловыделения) зависит от концентрации молекулярного водорода в смеси, начального давления в сосуде и степени обеднения смеси. Максимальная скорость выгорания топлива наблюдается у продуктов конверсии (синтез-газа), в стехиометрической смеси которых с воздухом объем водорода составляет около 14 %, минимальная – у чистого пропана, моделирующего углеводородное топливо. С обеднением смеси доля сгорающей смеси в единицу времени уменьшается (рис. 3б).

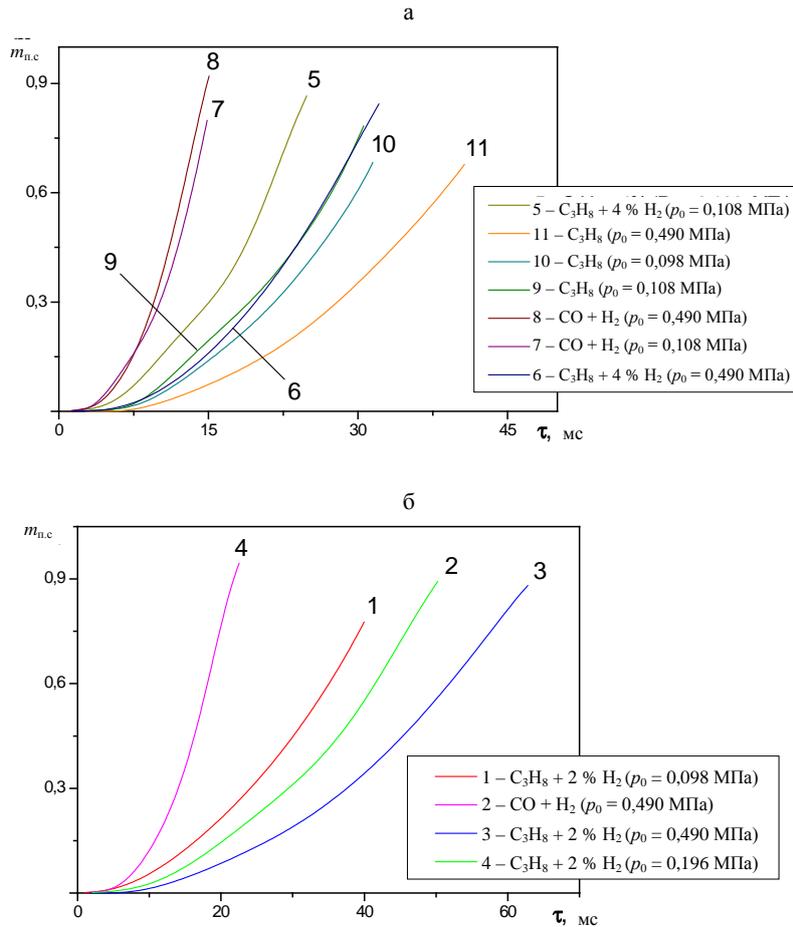


Рис. 3. Доля сгоревшей части смеси в функции времени горения τ в камере с боковым поджигом при: а - $\Phi = 1$ ($\alpha = 1$); б - $\Phi = 0,8$ ($\alpha = 1,25$)

Таким образом, непосредственная регистрация развития пламени методом скоростного фотографирования позволяет получить наглядное, удобное для зрительного восприятия, представление о развитии процесса горения в закрытом сосуде. Объем полученной информации позволяет определить основные параметры процесса горения и судить об особенностях развития пламени в закрытом сосуде. В частности, можно установить линейную зависимость доли сгоревшего топлива от развиваемого в сосуде давления.

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,