

тойчив:  $\alpha_1 = 1,18$ ;  $\alpha_2 = 1,3$ . Тем не менее двухстадийная волна горения оказывается неустойчивой из-за нарушения михельсоновского профиля реакции (2) и стока тепла в зоне реакции (1). На рис. 3 приведены профили температуры  $\Theta$  как функции пространственной переменной  $\xi$  в различные моменты времени. Ясно виден колебательный характер распространения.

Для проверки результатов анализа устойчивости методом узкой зоны реакции проведен еще ряд численных экспериментов. Результаты всех расчетов хорошо согласуются с приближенным анализом.

Таким образом, в работе исследована устойчивость распространения волны горения при протекании двух независимых реакций. Указаны области изменения параметров задачи, при которых стационарная волна устойчива. Показано, что тепловой поток в зону расположенной впереди реакции оказывает стабилизирующее влияние на волну горения. Напротив, искажение михельсоновского профиля второй реакции, происходящее за счет наличия первой, дестабилизирует волну.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Хайкин, А. К. Филопенко, С. И. Худяев. ФГВ, 1968, 4, 4, 591.
2. В. А. Вольперт, Б. И. Хайкин, С. И. Худяев.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1. Черноголовка, 1981.
3. А. Г. Мержанов, Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ПМТФ, 1972, 6, 99.
4. Б. И. Хайкин, А. К. Филопенко, С. И. Худяев и др. ФГВ, 1973, 9, 2, 169.
5. В. С. Берман, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1973, 1, 75.
6. A. K. Kapila, G. S. S. Ludford. Comb. Flame, 1977, 29, 2, 167.
7. S. V. Margolis, V. J. Matkowsky. SIAM J. Appl. Math., 1982, 42, 6, 1175.
8. М. Б. Боровиков, И. А. Буровой, У. И. Гольдшлегер. ФГВ, 1984, 20, 3, 3.
9. Е. А. Некрасов, А. М. Тимохин. ФГВ, 1984, 20, 4, 21.
10. В. С. Берман, Ю. С. Рязанцев, В. М. Шевцова. ФГВ, 1981, 17, 6, 72.
11. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.
12. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
13. Г. И. Баренблатт, Я. Б. Зельдович, А. Г. Истратов. ПМТФ, 1962, 4, 21.
14. А. П. Алдушин, С. Г. Каспарян. Докл. АН СССР, 1979, 244, 1, 67.
15. Г. М. Махвиладзе, Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1971, 5, 51.
16. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1, 19.

Поступила в редакцию 3/VI 1985

### ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ И ДОБАВОК ПАРОВ ВОДЫ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ МЕТАНА

*А. С. Бетев, В. П. Карпов, Е. С. Северин, А. И. Спасский*  
(Москва)

В настоящее время рассматривается возможность перевода многих видов транспортных двигателей на метан. Метан обладает высокими антидетонационными свойствами, что позволит перейти на повышенные степени сжатия при искровом зажигании с соответствующим выигрышем в экономичности. Работа двигателей на метане позволяет использовать более бедные составы смеси по сравнению с бензиновыми топливами, а это также дает выигрыш в экономичности и токсичности выхлопа. Использование таких составов связано с тем, что коэффициент диффузии смеси метан — кислород выше коэффициента температуропроводности, отсюда возникают особенности, связанные с диффузионно-тепловой неустойчивостью.

Цель настоящей работы — экспериментальное и расчетное физическое моделирование влияния продуктов горения и паров воды на турбулентное горение смесей метана в двигателе с искровым зажиганием.

Для сопоставления результатов экспериментального моделирования в сферической камере с известным полем турбулентности с условиями

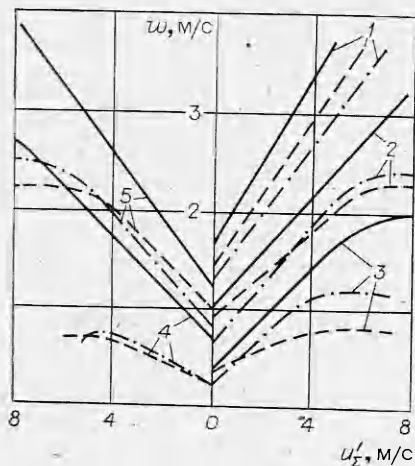


Рис. 1. Зависимости  $w(u'_\Sigma)$  для смесей  $\text{CH}_4 + 2\alpha (\text{O}_2 + 1,6\text{N}_2)$ ;  $p_0 = 100 \text{ кПа}$ ,  $T_0 = 385 \text{ К}$ .  
 1 — смесь без добавок; добавка продуктов, %: 2 — 20, 3 — 40; добавка паров воды, %: 4 — 40, 5 — 20. —  $\alpha = 1,1$ ; — — — — 0,8; — — — — 1,4.

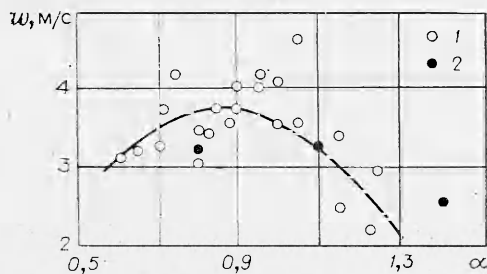


Рис. 2. Зависимость турбулентной скорости выгорания от состава смеси в двигателе.

экспериментах была 385 К. За счет такого выбора состава скорость ламинарного пламени оказывается такой же, как и в камере сгорания двигателя при параметрах конца хода сжатия. Корректность этого метода моделирования подтверждается результатами измерения ламинарных скоростей в установке быстрого сжатия [1]. Режимы частичных нагрузок двигателя и использование рециркуляции остаточных газов требуют знания характеристик горения смесей с определенной долей продуктов горения. Методика постоянного объема позволяет также получить данные по влиянию концентрации паров воды на нормальную скорость горения и турбулентную скорость выгорания. Горение смесей, разбавленных продуктами, исследовалось путем предварительного сжигания определенной доли смеси с последующим добавлением свежей. Пары воды добавляли путем предварительного сжигания в камере стехиометрической водородокислородной смеси при заданном давлении с последующим добавлением свежей смеси.

Результаты эксперимента для трех групп смесей с разными коэффициентами избытка кислорода  $\alpha$  представлены на рис. 1 в виде графиков зависимости турбулентной скорости выгорания  $w$  от среднеквадратичной пульсационной скорости  $u'_\Sigma$ . Нормальным скоростям ламинарных пламен  $u_n$  соответствуют точки на оси ординат.

Как видно из рис. 1, разбавление любой исходной смеси  $\text{CH}_4 + 2\alpha (\text{O}_2 + 1,6\text{N}_2)$  продуктами или парами воды приводит к снижению скоростей ламинарного и турбулентного горения. Это объясняется паде-

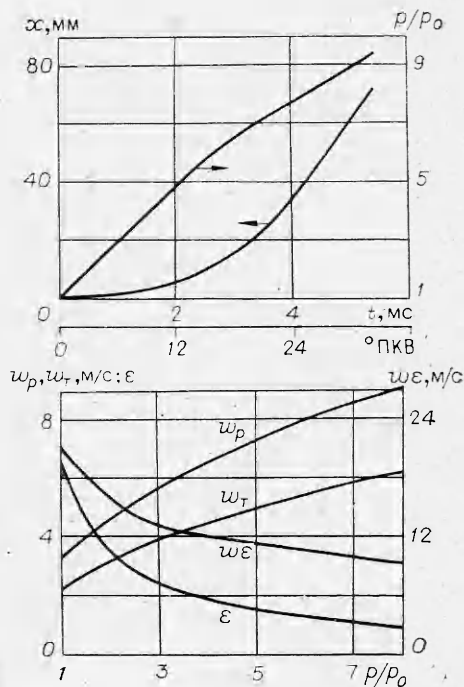


Рис. 3. Давление, положение фронта выгорания и текущие параметры турбулентного горения в двигателе.

конца хода сжатия в двигателе, где начальное давление  $\sim 1,0 \text{ МПа}$  и температура 550—650 К, в данных опытах при атмосферном начальном давлении воздух был заменен смесью  $\text{O}_2 + 1,6\text{N}_2$ . Начальная температура во всех

нием температуры горения при разбавлении. Уменьшение турбулентных скоростей выгорания за счет разбавления продуктами происходит равномерно во всем диапазоне  $\alpha$ , тогда как разбавление парами воды сильнее влияет на горение смесей, далеких от стехиометрического состава, и слабее — на смесь с  $\alpha = 1,1$ .

Важная тенденция, иллюстрирующая влияние диффузионно-тепловой структуры фронта пламени на турбулентное горение, обнаруживается при сравнении кривых  $w(u'_\Sigma)$  для одинаково разбавленных смесей с  $\alpha = 1,4$  и  $0,8$ . При  $\alpha = 1,4$  величина  $u_n$ , как правило, ниже. В то же время наклон начального участка кривой  $w(u'_\Sigma)$  и максимальная величина  $w$  (при  $u'_\Sigma$ , приближающихся к условиям гашения турбулентного пламени) для бедных разбавленных смесей метана выше, чем для богатых.

Сопоставим результаты, полученные в модельной камере и в камере сгорания реального двигателя. В условиях одноцилиндрового двигателя (камера сгорания цилиндрической формы, диаметр 82 мм, степень сжатия 9) скорости турбулентного выгорания рассчитаны по начальному участку индикаторной диаграммы при 1000 об/мин и коэффициенте наполнения 0,54, или коэффициенте остаточных газов 14—16%. Сопоставление представлено на рис. 2. Точки 1 — турбулентные скорости выгорания в условиях двигателя, 2 — турбулентные скорости выгорания при  $u'_\Sigma = 3$  м/с, что, по данным [2], примерно соответствует уровню турбулентности при 1000 об/мин на том же двигателе. При этом значения  $w$ , соответствующие  $u'_\Sigma = 3$  м/с и 15% остаточных газов, увеличены в соответствии с барическим показателем для данной пульсационной скорости, равным +0,2. К сожалению, исследование влияния начального давления на  $w$  проведено в диапазоне давлений, более низких, чем в двигателе. Как видно из рис. 2, для  $\alpha = 0,8$  и  $1,1$  совпадение вполне удовлетворительное. При  $\alpha = 1,4$  данные модельной камеры лежат выше. Это можно связать с тем, что сопоставляется бензиновая смесь с метановой, а смещение в диапазон бедных составов зависимости турбулентной скорости выгорания метана известно [3]. Кроме того, в условиях двигателя паровая фаза может быть несколько беднее расчетного состава из-за несовершенства смешения (наличие капель, расслоение и т. п.).

Задача физического моделирования горения различных смесей в двигателях состоит в предсказании диаграмм давления. Располагая величинами  $w$ , измеренными в модельном эксперименте, как описано выше, можно построить диаграмму давления в двигателе при любой заданной степени разбавления продуктами и любых начальных условий. Для демонстрации такой возможности проведен расчет диаграммы давления в двигателе со степенью сжатия 9 для случая метано-воздушной смеси с  $\alpha = 1,1$ , разбавленной продуктами до 15% объема, при  $u'_\Sigma = 3$  м/с. Выбор конкретных значений параметров обусловлен возможностью прямого сравнения с экспериментом. В рассматриваемых условиях  $w = 2,2$  м/с. Из рис. 1 видно, что при  $u'_\Sigma = 3$  м/с  $w$  для рассматриваемой смеси определяется главным образом значением  $u_n$ . Поэтому изменение  $w$  с ростом температуры перед фронтом  $T_u$  учитывалось по известной эмпирической формуле для стехиометрических углеводородовоздушных смесей:  $u_n = 10 + 3,42 \cdot 10^{-4} \cdot T_u^2$  [4].

Расчет проводился в приближении постоянного объема численным решением системы уравнений

$$\frac{dx}{dt} = w(p, T_u) \varepsilon, \quad \frac{V_b(x)}{V} = 1 - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T_u}{T_0} \cdot \frac{p_e - p_0}{p_e - p_0},$$

$$T_u = T_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \varepsilon = \frac{\frac{p}{p_0} (p_e - p_0) - \frac{T_u}{T_0} (p_e - p)}{\frac{p}{p_0} (p - p_0)}$$

Зависимость объема продуктов от положения фронта выгорания рассчитывалась для случая сферической поверхности с центром в точке поджигания на боковой стенке цилиндра. Результаты расчета  $p(t)$  и радиуса фронта  $x(t)$  показаны на рис. 3. Здесь также изображены в зависимости от безразмерного текущего давления скорость выгорания в модельной камере с учетом подъема температуры смеси перед фронтом  $w_t$ , текущая скорость выгорания при горении в двигателе  $w_p$ , текущее значение степени расширения при сгорании  $\epsilon$  и видимая скорость турбулентного выгорания в двигателе  $w(p, T_u)\epsilon$ . В итоге получено время сгорания  $\tau_b \approx 5$  мс, или  $30^\circ$  угла поворота коленчатого вала (ПКВ). Относительное изменение объема камеры сгорания за этот период составляет для конкретных условий эксперимента на двигателе  $\Delta V/V \approx 0,08$ . Таким образом, в данном случае расчет в приближении постоянного объема вполне оправдан.

Сопоставление с диаграммой давления в реальном двигателе в так называемой основной фазе сгорания (интервал быстрого подъема давления) показывает хорошее согласие расчета с экспериментом. Как известно, в двигателе при поджигании смеси у стенки начальная фаза сгорания (интервал времени от момента подачи искры до начала заметного подъема давления) значительно превосходит соответствующий интервал в модельной камере с центральным зажиганием. Это можно объяснить меньшей степенью расширения из-за снижения температуры продуктов при теплоотводе в стенку. Кроме того, динамика роста начального очага в турбулентной горючей смеси пока еще слабо изучена. Таким образом, приведенный выше расчет диаграммы давления на основе данных модельного эксперимента следует рассматривать как важную составную часть полного решения задачи физического моделирования турбулентного горения перспективных топлив в двигателях с искровым зажиганием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Вуйтицки, Т. Лежански и др. Archivum Combustions, 1982, 2, 3/4, 149.
2. Е. С. Семенов, А. С. Соколик: Изв. АН СССР. ОТН, 1958, 8, 130.
3. В. П. Карпов, Е. С. Северин. ФГВ, 1980, 16, 1, 45.
4. М. Zabetakis. Flammability characteristics of Combustible gases and Vapors. US Bureau of Mines. Bull. 627. Washington, 1965.

Поступила в редакцию 20/XI 1984,  
после доработки — 5/V 1985

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ МАГНИЯ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

А. В. Флорко, С. В. Козицкий, А. Н. Писаренко, А. М. Мацко  
(Одесса)

Температура в зоне химической реакции — важнейший параметр, определяющий, в частности, скорость ионизации и излучательные характеристики горящего объекта. При горении частиц металлов она зависит от соотношения между скоростями тепловыделения в зоне реакции и теплоотвода. Определенное влияние оказывает также и испарение конденсированных продуктов реакции. Поэтому математические модели, описывающие процесс горения частиц металлов, содержат такие физические параметры, как степень черноты поверхности частицы в зоне горения, степень испарения продуктов реакции и др. [1—3]. Опытное или расчетное определение этих величин — достаточно сложная задача.