

УДК 621.43.056

Д.А. ДОЛМАТОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАЗРЯДНОЕ СТИМУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ В ЗОНЕ БЕДНОГО ПЛАМЕНИ

В статье рассматривается возможность использования стационарного электрического разряда в зонах с большим коэффициентом избытка воздуха для увеличения скорости и интенсивности реакции горения топлива и предотвращения затухания. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность применения разрядной стимуляции. Исследованы особенности генерации важных промежуточных компонент и изменение характеристик камеры сгорания при различном месторасположении дугового разряда. Приведены результаты математического моделирования электрохимических процессов в бедной смеси.

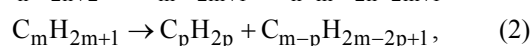
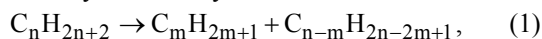
Ключевые слова: *реакционная способность, электронный удар, степень избытка воздуха, бедный срыв пламени, скорость реакции*

Введение и постановка задачи

Современная тенденция широкого применения пламен с высокими значениями коэффициента избытка воздуха в камерах сгорания ГТУ в рамках борьбы с эмиссией NO_x делает актуальными исследования, связанные с увеличением надежности низкотемпературных КС – в частности, предотвращение бедного срыва пламени и обеспечение высокого коэффициента полноты сгорания [1, 2]. Для основной зоны горения границы бедного срыва в настоящее время достаточно хорошо изучены на широком спектре объектов и параметров рабочего режима [1, 3] – как правило, основной вклад в предотвращение бедных срывов и развития нестационарных режимов горения вносит качественная гомогенизация и перемешивание топливовоздушной смеси. В отличие от богатых, в т.ч. – стехиометрических пламен, в бедных зонах практически отсутствуют эффекты затухания, вызванные слишком малым числом столкновений частиц топлива и кислорода. Вместо этого основной вклад (с точки зрения химической кинетики и термодинамики) вносят два эффекта: снижение скорости основных реакций за счет низкой температуры окружающей среды и падение концентрации активных радикалов. Анализ скоростных коэффициентов чувствительности детального механизма воздушного горения легких и средних углеводородов, а также исследование возможных путей реакции, свидетельствует о прямой зависимости скорости результирующей реакции горения от концентраций радикалов C_nH_{2n} , O, OH и некоторых других [3, 5].

Дважды расщепленные алкильные радикалы, вообще говоря, свойственны практически любой зоне камеры сгорания, в особенности при использо-

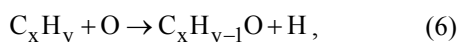
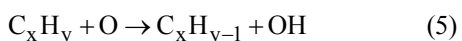
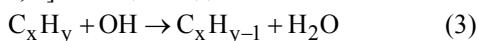
вании керосина в качестве топлива. Данный эффект связан с низким (790 – 910 К) температурным порогом расщепления ряда изомеров средних углеводородов и высокой вероятностью потери водородного атома вследствие кислородной атаки любого типа [5]. Согласно экспериментальным исследованиям пламен при помощи ЛИФ-спектроскопии, при достаточных высоких температурах значимые концентрации свободных радикалов C_2H_4 и C_3H_6 наблюдаются даже в инертных зонах гетерогенных пламен [4]. Поскольку в инертной зоне отсутствуют реакции кислородного окисления молекул топлива, данный эффект, очевидно, связан с двукратным термическим расщеплением крупных молекул по двухступенчатому механизму:



в результате чего образуется два алкильных радикала вида $\text{C}_x\text{H}_{2x+1}$ и один радикал с двумя неспаренными электронами на внешних орбиталях. Отметим, что линейные изомеры алканов, а также углеводороды с малыми углеродными числами (бутан и более легкие) практически не подвержены описанному расщеплению, а разветвленные изомеры, начиная с изо- и неопентана, напротив, легко вступают в реакцию, причем реакционная способность растет с увеличением степени разветвленности (т.е., например, вклад неопентана в образование радикала C_3H_6 значительно выше вклада изопентана и т.д.). Для низкотемпературных бедных пламен двухступенчатый механизм менее свойственен, однако кислородная атака, очевидно, также обеспечивает достаточное количество свободных радикалов в зонах горения (в инертных предпламенных зонах низкотемпе-

ратурных камер сгорания радикалы описанного типа практически не фиксируются). Вместе с тем, согласно данным практических исследований Лоу и Варнатца [5, 6], концентрации радикалов C_nH_{2n} в зоне дожигания керосиновых, метановых и пропановых пламен со средней конечной температурой 1000 – 1300 К на несколько порядков ниже концентраций аналогичных веществ в стехиометрических и богатых высокотемпературных пламенах со средней конечной температурой 1700 – 2100 К.

Основной вклад в быстрый механизм окисления молекул и радикалов топлива, как известно, вносят гидроксильная и атомарная кислородная атаки [1, 3, 5, 6]. Реакции вида



обеспечивающие ветвление цепи, окисление топлива и собственно энерговыделение, являются довольно медленными (и, таким образом, скоростью определяющими) и сильно зависят от температуры. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, концентрация гидроксильных радикалов и атомарного кислорода также напрямую связана с температурой окружающей и среды, при этом практически не зависят от давления. На рис. 1 представлены графики распределения мольных долей ν O (а) и OH (б) для метан-кислородного (жирные сплошные линии), метано-воздушного (жирные пунктирные), пропан-кислород-аргонового (тонкие сплошные) и керосино-воздушного (тонкие штрихпунктирные) пламен как функция средней температуры (данные экспериментальные, осреднены по изотермам без учета зон горения [6]).

Особенности горения в низкотемпературных зонах с низкими концентрациями свободных радикалов, наиболее ярко выраженные в зонах дожигания и смешения приводят к ослаблению интенсивности пламени и его затуханию. При этом резко возрастает эмиссия остаточных углеводородов, монооксида углерода, сажи и других побочных продуктов сгорания. Вследствие остановки горения в зонах дожигания, а также бедных срывов пламени, проявляющихся на некоторых режимах работы, коэффициент полноты сгорания керосинового топлива падает до значений 0,972 – 0,985 [1]. В целях обеспечения эффективного дожигания и предотвращения бедных срывов на дроссельных режимах работы двигателя целесообразно спровоцировать радикальные механизмы окисления топлива в низкотемпературных зонах. Поскольку впрыск воды может вызвать гашение пламени вместо увеличения концентрации гидроксидов, а расщепление молекулярного кислорода практически

невозможно без резкого повышения температуры, наиболее оптимальным решением является повышение реакционной способности бедной смеси и генерация агрессивных радикалов электронным ударом в ходе пробойного дугового газового разряда.

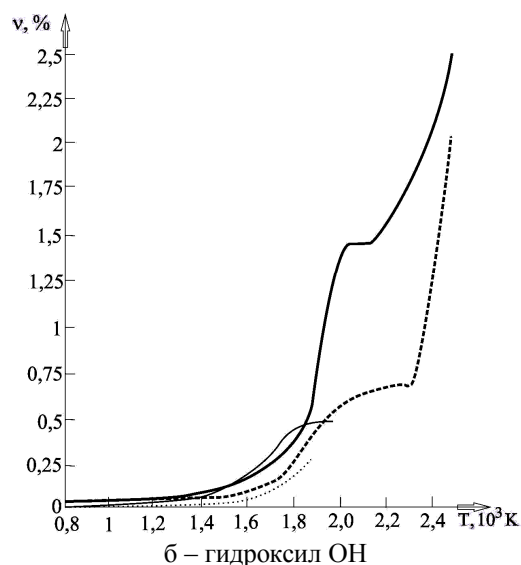
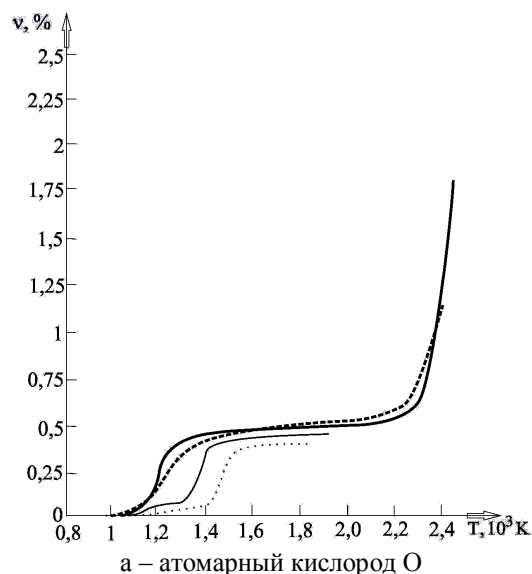


Рис. 1. Мольные доли свободных радикалов

Математическая модель электрохимического низкотемпературного горения

При моделировании электрохимических процессов с учетом химической кинетики необходимо использовать комбинированную математическую модель, явно или неявно учитывающую вероятность электронной инициации реакций различного типа наряду с традиционными уравнениями газовой динамики сплошной среды [7, 8]. Поскольку полный генеральный баланс реакций горения керосина даже без учета электрохимических реакций чрезвычайно сложен, в настоящей работе при вычислениях ис-

пользовался S-механизм, составленный на основании скоростных коэффициентов чувствительности. При составлении системы уравнений приняты следующие допущения:

- 1) электрохимические реакции относятся только к электронному типу;
- 2) взаимодействие свободных электронов с крупными частицами протекает либо в виде упругого столкновения, либо приводит к диссоциации;
- 3) эффектом Соре можно пренебречь.

С учетом вышесказанного, система уравнений математической модели выглядит как

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^i} (\rho C^i) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{w}_n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^i} (\rho \tilde{w}_n C^i) + \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\rho C^{i*} \tilde{w}_n - \rho D_n \text{grad} \tilde{w}_n \right) = \overline{M_n v_n} \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{C})}{\partial t} + \nabla (\bar{\rho} \tilde{C} \times \tilde{C}) + \nabla \left(\bar{\rho} + \bar{\rho} \tilde{C}'' \times \tilde{C}'' \right) = \bar{\rho} g, \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{i})}{\partial t} + \nabla \left(\bar{\rho} \tilde{C} \tilde{i} + \rho \tilde{C}'' \tilde{i}'' \right) + \nabla (\lambda \nabla T) = Q_r, \quad (10)$$

$$v_n = \sum k_p \prod [A] - \sum k_q \prod [B], \quad (11)$$

$$\sigma_i = \int_{\Delta E_D}^{\varepsilon} d\sigma = \frac{\pi q_e^4 (\varepsilon - \Delta E_D)}{\varepsilon^2 \Delta E_D}, \quad (12)$$

$$P_D = j_{\text{arc}} \pi r^2 N_C \frac{\sigma_i l_{\text{arc}}}{q_e d_i} \sqrt{\frac{m_e}{\varepsilon}}, \quad (13)$$

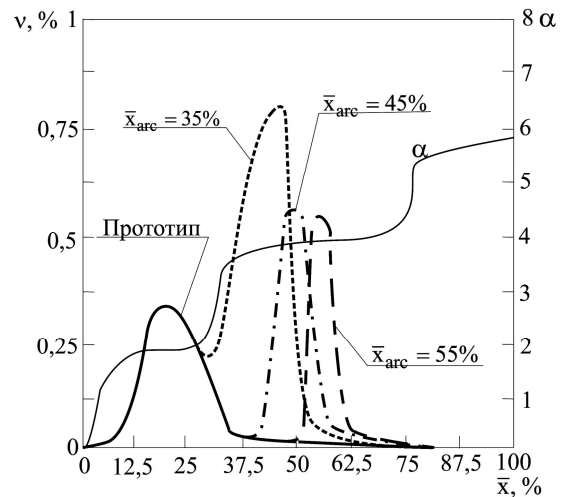
где ρ – плотность; C^i – компоненты скорости; x^i – контравариантные координаты; w_n – массовая доля n-го компонента; D_n – коэффициент диффузии \gg ; M_n – молярная масса \gg ; v_n – скорость реакции образования \gg ; g – метрический тензор; i – энтальпия; Q_r – суммарный термодинамический эффект реакций; k_p, k_q – константы скоростей реакций образования и расхода n-го компонента; $[A], [B]$ – псевдоравновесные концентрации веществ, участвующих в реакциях образования и расхода n-го компонента; σ_i – диссоциативное сечение i-го вещества; ΔE_D – энергия диссоциации; ε – полная энергия свободного электрона в разряде; q_e, m_e – заряд и масса электрона; j_{arc} – плотность тока в разряде; l_{arc}, r – длина и диаметр ствола разряда; d_i – диаметр частицы i-го вещества; N_C – математическое ожидание количества частиц данного типа на произвольной линии тока в разряде; P_D – число диссоциаций в единицу времени.

Константы термохимических реакций и термодинамический эффект определяются согласно форме Аррениуса и уравнению потенциала Гиббса [5, 6].

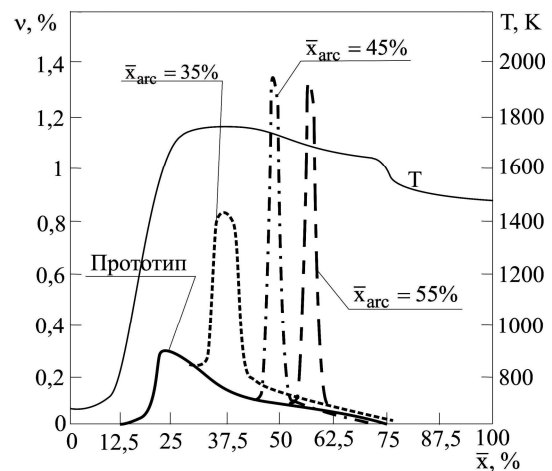
Результаты

В ходе численных экспериментов по исследованию влияния разряда на бедную топливом зону пламени были получены значения осредненных по сечению основных параметров, представленные на рис. 2, 3. \bar{x}_{arc} – относительная координата разряда в % от длины КС.

В качестве прототипа была выбрана кольцевая камера сгорания двигателя CFM56-7 с конечной температурой на номинальном режиме 1473 К. Межэлектродное расстояние 30 мм, диапазон конечных температур T_{Γ}^* – от 1100 до 1480 К. При численном моделировании использовался программный пакет высокого уровня для высокопроизводительных систем с полуоткрытым кодом, модифицированным для возможности учета электрохимических реакций.



а – содержание OH и коэффициент избытка воздуха



б – содержание O и температура смеси

Рис. 2. Влияние разряда на основные параметры

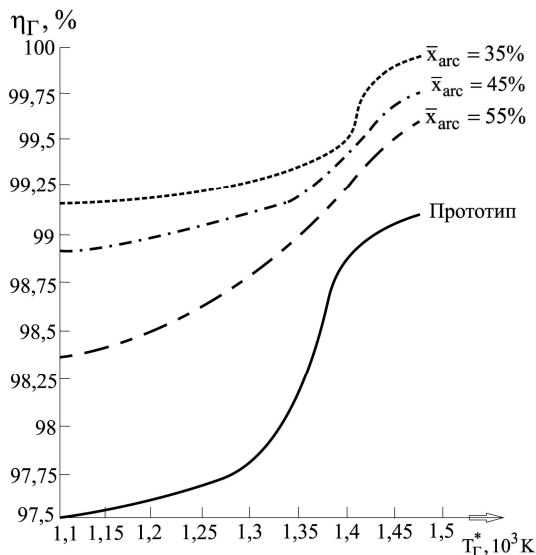


Рис. 3. Коэффициент полноты сгорания

Высокий выход атомарного кислорода слабее влияет на полноту сгорания топлива. Интересным результатом является практически постоянный выход как радикалов OH, так и O при расположении разряда на 0,45 и на 0,55 длины камеры сгорания.

Значительно более высокий выход O при существенном падении OH при расположении электродов в более холодной зоне обусловлен большим диссоциативным транспортным сечением молекулярного кислорода по сравнению с водой [7] и значительно более высокой концентрацией кислорода в зоне дожигания и смешения.

Очевидно, наиболее эффективным методом стимуляции горения бедных пламен является расположение разрядника достаточно близко к зоне основного горения для генерации максимального числа гидроксильных радикалов. Для получения более полной картины целесообразно изучить влияние давления в камере сгорания, длины и мощности разряда, а также химического состава топлива на интегральные характеристики устройства.

Литература

1. Законы горения / Под общ. ред. Ю.В. Полежаева. – М.: Энергомаш, 2006. – 352 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Fristrom R.M. Flame structure and processes / R.M. Fristrom – N.Y.: 1995. – Oxford Univ. Press. – 823 p.
4. Щетинков Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – М.: Наука, 1965. – 740 с.
5. Варнац Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнац, У. Маас, Р. Дибл – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.
6. Law C.K. Dynamics of stretched flames / C.K. Law // 22nd Symp. (Int.) Comb., The Combustion Institute, Pittsburg, 1989. – P. 1381 – 1394.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Долгопрудный: Д. «Интеллект», 2009. – 736 с.
8. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы / Под ред. Л.С. Полака. – М.: Наука, 1971. – 224 с.

Поступила в редакцию 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный ин-т», Харьков, Украина.

РОЗРЯДНА СТИМУЛЯЦІЯ ШВИДКОСТІ ГОРІННЯ В ЗОНІ БІДНОГО ПОЛУМ'Я

Д.А. Долматов

У статті розглянута можливість використання стаціонарного електричного розряду в зонах з великим значенням коефіцієнта надлишку повітря для підвищення швидкості та інтенсивності реакції горіння палива та запобігання затухання. Розглянуті основні фактори, що впливають на ефективність застосування розрядної стимуляції. Досліджені особливості генерації важливих проміжних компонент у залежності від місця розташування електричної дуги. Наведені результати математичного моделювання електрохімічних процесів у бідній суміші.

Ключові слова: реакційна спроможність, електронний удар, ступінь надлишку повітря, бідний зрив полум'я, швидкість реакції.

DISCHARGE STIMULATION OF BURNING SPEED IN POOR FLAMES

D.A. Dolmatov

The article consists researching considering of stationary arc using possibility in the area with great excess air ratio for increasing of burning speed and intensity and extinguish prevention. The main determination factors, that influence on arc stimulation efficiency, are considered. The features of important semi-products generation by arc position are researched. There are results of mathematic modeling of electro-chemical processes in poor mixture.

Key words: reactionary possibility, electron stroke, excess air ratio, poor flameout, reaction speed.

Долматов Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ditrihantelson@yandex.ru.