

ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ СМЕСИ $\text{CH}_4\text{—O}_2$ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МОЛЕКУЛ O_2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

А. М. Старик, Б. И. Луховицкий, Н. С. Титова

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва, star@ciam.ru

Анализируется возможность интенсификации воспламенения метаноокислородной смеси в сверхзвуковом потоке за фронтом наклонной ударной волны путем возбуждения молекул O_2 в состояния $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ в электрическом разряде. На основе численного моделирования показано, что активация молекул O_2 электрическим разрядом приводит к ускорению цепных реакций в смеси $\text{CH}_4\text{—O}_2$ и сокращению длины зоны индукции. Даже при небольшой энергии, подведенной к молекулам O_2 в разряде ($\approx 3 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³), удается в сотни раз сократить длину задержки воспламенения и инициировать горение на расстояниях ≈ 1 м от зоны воздействия при относительно низких температурах газа за фронтом (≈ 1000 К) и невысоких давлениях ($\approx 10^5$ Па). Возбуждение молекул O_2 электрическим разрядом намного эффективнее простого нагрева смеси.

Ключевые слова: воспламенение, горение, электрический разряд, возбужденные молекулы, цепные реакции.

ВВЕДЕНИЕ

Возбуждение колебательных и электронных состояний реагирующих молекул является весьма перспективным методом интенсификации воспламенения и горения различных смесей [1–3]. Ранее было показано, что присутствие электронно-возбужденных молекул $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ в исходной водородовоздушной или метановоздушной смеси приводит к уменьшению температуры воспламенения, сокращению длины зоны индукции и даже к увеличению эффективности преобразования химической энергии компонентов смеси в тепловую [4–6]. Возбуждение молекул O_2 из основного триплетного состояния $X^3\Sigma_g^-$ в синглетные состояния $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ возможно как резонансным лазерным излучением, так и электронным ударом при соответствующей энергии электронов [4–9].

Горение водородо- и углеводородовоздушных смесей в большинстве практически интересных случаев происходит в диапазоне давлений $p_0 = 10^4 \div 10^6$ Па. При таких давлениях

для получения заметного количества возбужденных молекул $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ необходимо использовать несамостоятельный разряд. Проведенные в последние годы теоретические и экспериментальные исследования физико-химических процессов в кислородной плазме, создаваемой несамостоятельным разрядом [10–15], показали, что даже при давлениях, близких к атмосферному, возможно получение значительного количества молекул синглетного кислорода $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ ($\approx 4\%$). В отличие от случая возбуждения молекул O_2 лазерным излучением в плазме электрического разряда всегда будут присутствовать в небольших количествах атомы О и молекулы O_3 , а также колебательно-возбужденные молекулы O_2 в основном электронном состоянии [10–13]. Поэтому кинетика инициирования горения при использовании для активации молекул O_2 электрического разряда может существенно отличаться от случая возбуждения молекул O_2 резонансным лазерным излучением, который был рассмотрен ранее для смесей $\text{H}_2\text{—O}_2$ (воздух) и $\text{CH}_4\text{—O}_2$ (воздух) в [4–6].

Целью данной работы является анализ кинетических механизмов, ответственных за интенсификацию процесса воспламенения метаноокислородной смеси при возбуждении молекул O_2 электрическим разрядом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-08-81038, 07-08-12166, 05-02-16419), а также при частичной поддержке МНТЦ (проект № 2740) и INTAS (грант № 03-51-4736).