

**Распад плазмы высоковольтного наносекундного разряда
в газообразных углеводородах и их смесях с кислородом***М.А. Попов, Е.М. Анохин*

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Разрядная плазма может оказывать существенное воздействие на воспламенение и горение углеводородов [1]. С её помощью удалось значительно ускорить воспламенение топлива, расширить область параметров, при которых возможно воспламенение и поддержание горения, и сократить вредные выбросы [2]. Для выяснения механизмов влияния плазмы на воспламенение и горение и для оптимизации этих эффектов в реальных энергетических системах необходимо уметь моделировать процессы в плазме углеводородных смесей. В частности, необходимо знать коэффициенты электрон-ионной рекомбинации, которые определяют время жизни плазмы и могут влиять на плотность плазмы и наработку атомов и радикалов во время разряда.

Для определения коэффициентов рекомбинации было проведено экспериментальное исследование распада плазмы метана, этана, пропана при комнатной температуре газов в диапазоне давлений 2-20 Торр. В качестве источника плазмы использовался высоковольтный наносекундный разряд с амплитудой импульса 25 кВ и длительностью 30 нс. Зависимость концентрации электронов от времени измерялась СВЧ-интерферометром для начальных концентраций электронов $(1-3) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Полученные из эксперимента эффективные коэффициенты электрон-ионной рекомбинации оказались на порядок величины больше, чем характерные величины для парной диссоциативной рекомбинации электронов и простых ионов в углеводородах. На основании этого было сделано предположение о быстром образовании кластерных ионов в процессе распада плазмы, поскольку обычно скорость диссоциативной рекомбинации кластерных ионов на порядок величины превышает аналогичную величину для простых молекулярных ионов. Для проверки этого предположения было проведено численное моделирование распада плазмы этих газов. Для этого был определен начальный ионный состав, уравнения баланса электронов и ионов решались совместно с уравнением для температуры электронов. Также был проведен учет влияния неоднородности плазмы на результат определения плотности электронов. Теоретические расчёты хорошо согласовались с экспериментом только в предположении наличия кластерных ионов. Сопоставляя результаты теории и эксперимента, удалось определить скорость образования кластерных ионов в этане и пропане и скорость рекомбинации электронов с ними [3].

В работе также были проведены эксперименты по определению динамики плотности электронов в углеводородо-кислородных смесях при различных стехиометрических соотношениях. Оказалось, что скорость рекомбинации плазмы в этих смесях превосходит скорость рекомбинации в чистых реагентах, полученную в [3], на порядок величины.

При дальнейшем изучении выяснилось, что динамика рекомбинации плазмы в этих смесях в значительной степени зависит от количества разрядных импульсов. Характер этой зависимости немонотонный – с увеличением числа разрядных импульсов эффективная скорость рекомбинации плазмы растёт, достигая максимума, затем начинает падать и выходит на стационарное значение, не меняющееся с ростом числа импульсов. Было сделано предположение, что под действием разряда происходит постепенное окисление горючей смеси, и спустя достаточно большое количество импульсов рекомбинация плазмы определяется образовавшимися продуктами: водой и углекислым газом. В ходе исследования распада плазмы в парах воды было получено хорошее согласие экспериментальных результатов рекомбинации плазмы в чистой воде и в смеси пропана с кислородом после большого количества разрядных импульсов (полного окисления горючей смеси) при одинаковых парциальных давлениях паров воды.

Литература

1. *Samukawa S., Hori M., Rauf S.* [et al.], The 2012 Plasma Roadmap, J. Phys.D: Appl. Phys. 45, 253001 (2012)
2. *Starikovskiy A., Aleksandrov N.*, Plasma-assisted ignition and combustion, Progress in Energy and Combustion Science 39, 61-110 (2013)
3. *Anokhin E., Popov M.* [et al.], Kinetic mechanism of plasma recombination in methane, ethane and propane after high-voltage nanosecond discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 25 (2016) 044006 (10pp)