Распад плазмы высоковольтного наносекундного разряда в горючих смесях

Анохин Е.М., Попов М.А., 1Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, anjohn@mail.ru
1Принстонский университет, г. Принстон, США, astariko@princeton.edu

Исследование воздействия разрядной плазмы на воспламенение и горение углеводородов является одним из перспективных направлений в области низкотемпературной плазмы [1]. С помощью разрядной плазмы удалось существенно 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. Для этого, в частности, надо 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 углеводородных ионов было выполнено экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование распада плазмы в метан-кислородных, этан-кислородных и пропан-кислородных смесях при различных стехиометрических соотношениях. Эксперименты проводились в диапазоне давлений газа 2 – 20 Торр при температурах от 300 до 450 К. Концентрация электронов измерялась двухканальным СВЧ-интерферометром с рабочей частотой 94 ГГц. 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 в диапазоне (1 – 3) × 1012 см–3.

Анализ результатов измерений показал, что скорость рекомбинации плазмы в исследованных горючих смесях превосходит скорость рекомбинации в чистых углеводородах [3] и чистом кислороде. При этом динамика рекомбинации плазмы в этих смесях, в отличие от случая чистых газов, зависела от количества разрядных импульсов. Эта зависимость была немонотонный – с увеличением числа импульсов эффективная скорость рекомбинации плазмы росла, достигала максимума, затем начинала падать и выходила на стационарное значение, не меняющееся с ростом числа импульсов. Наблюдаемые закономерности можно объяснить тем, что под действием разряда происходит постепенное окисление горючей смеси, и спустя достаточно большое количество импульсов рекомбинация плазмы определяется образовавшимися продуктами: водой и углекислым газом. Немонотонность скорости рекомбинации может быть связана с наработкой промежуточных веществ в процессе окисления горючих смесей, присутствие которых ускоряет распад плазмы. Также было получено хорошее совпадение между скоростями распада плазмы в продуктах окисления горючих смесей и в случае плазмы в парах воды при условии их одинаковых парциальных давлений.

Литература

1. Samukawa S., Hori M., Rauf S. et al. J. Phys.D: Appl. Phys. 2012, 45, 253001
2. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39, 61-110
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)