

РАЗВИТИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ГОРЮЧИХ СМЕСЯХ

Е. М. Анохин¹, М. А. Попов¹, И. В. Кочетов^{2,3}, Н. Л. Александров¹

Исследовано развитие разряда в метан- и водород-кислородной смесях под действием повторяющихся высоковольтных наносекундных импульсов. Показано, что в случае метан-кислородной смеси с ростом числа импульсов доля вложенной в разряд энергии и максимальный разрядный ток проходят через минимум, а скорость распада плазмы, наоборот, достигает максимума. Наблюдаемые закономерности объясняются частичным окислением топлива, в результате чего в газовой смеси нарабатываются промежуточные компоненты, которые приводят к быстрой гибели электронов и ускорению распада плазмы.

Ключевые слова: высоковольтный наносекундный разряд, распад неравновесной плазмы, электрон-ионная рекомбинация, горючая смесь, окисление топлива.

Воспламенение горючих смесей под действием неравновесной разрядной плазмы в последнее десятилетие привлекает большое внимание исследователей в связи с многочисленными возможными применениями [1–3]. Экспериментально показано, что с помощью разрядной плазмы можно существенно снизить время задержки и температуру воспламенения, стабилизировать пламена и расширить область горения для различных видов топлива.

Для исследования механизмов стимулированного плазмой воспламенения и окисления углеводородов выполнены многочисленные эксперименты, в том числе – под действием повторяющихся высоковольтных наносекундных разрядов, позволяющих производить наработку химически активных частиц и организовывать воспламенение в

¹ МФТИ, 141700 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: nick_aleksandrov@mail.ru.

² ТРИНИТИ, 142190 Россия, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

хорошо контролируемых условиях [4–6]. При этом основное внимание было уделено влиянию неравновесной разрядной плазмы на процессы окисления и воспламенения.

В настоящей работе, в отличие от прежних исследований, изучается влияние изменения состава газа под действием химических процессов окисления на свойства плазмы во время высоковольтного наносекундного разряда и в его послесвечении. Используемая экспериментальная установка и методы диагностики подробно описаны в [5, 7]. Разряд инициировался и развивался в кварцевой трубке с внутренним диаметром 47 мм. Высоковольтный электрод имел форму конуса с углом 60° , а низковольтным электродом служило заземленное кольцо. Расстояние между электродами было 20 см. Разряд зажигался в стехиометрических смесях $\text{CH}_4:\text{O}_2$, $\text{H}_2:\text{O}_2$ и в чистом CH_4 при давлениях в диапазоне 2–6 Торр и комнатной температуре. Для инициирования разряда использовались высоковольтные импульсы с амплитудой 24 кВ, длительностью на полувывсоте 25 нс и временем роста напряжения 5 нс. Напряжение подводилось к разрядному промежутку с помощью коаксиального кабеля с импедансом 50 Ом. Частота подачи импульсов напряжения составляла от 10 до 20 Гц. Удельный энерговыход в одном импульсе лежал в диапазоне 0.002–0.007 эВ на молекулу, что позволяло пренебречь нагревом газа.

С помощью щунта обратного тока измерялись амплитуды и формы падающего $U_{\text{пад}}$ и отраженного $U_{\text{отр}}$ импульсов напряжения. Энергия импульса определялась как интеграл по времени от $U(t)^2/R$, где R – волновое сопротивление кабеля. Энерговыходом называлась разность энергий падающего и отраженного импульсов. Сила тока в разряде рассчитывалась как $(U_{\text{пад}} - U_{\text{отр}})/R$. Также были выполнены измерения плотности электронов во время распада плазмы в послесвечении разряда. Для этого использовался СВЧ интерферометр на частоте 94 ГГц (длина волны 3 мм).

На рис. 1 приведены доля вкладываемой в разряд энергии и амплитуда разрядного тока для изучаемых газов в зависимости от числа импульсов. В смеси $\text{H}_2:\text{O}_2$ и чистом CH_4 эти величины практически монотонно растут с увеличением числа импульсов, а в случае смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2$ доля вкладываемой в разряд энергии и амплитуда разрядного тока сначала уменьшаются с ростом числа импульсов, достигают минимума после прохождения ~ 2000 импульсов и далее растут.

На рис. 2 представлена эволюция во времени плотности электронов при распаде плазмы в послесвечении высоковольтного наносекундного разряда в смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2$ после прохождения различного числа импульсов напряжения. Согласно измерениям, скорость распада плазмы сначала падает с ростом числа импульсов, а после примерно 1700 импульсов начинает расти. Таким образом, эта скорость также немонотонным образом

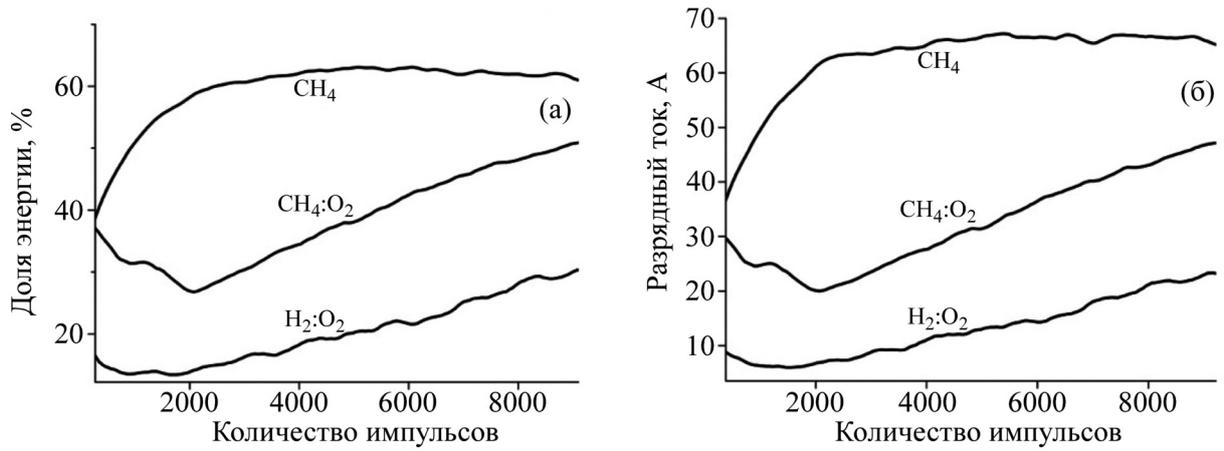


Рис. 1: Доля вкладываемой в разряд энергии (а) и средний разрядный ток (б) для стехиометрических смесей CH₄:O₂, H₂:O₂ и чистого CH₄ при 2 Торр в зависимости от числа импульсов напряжения.

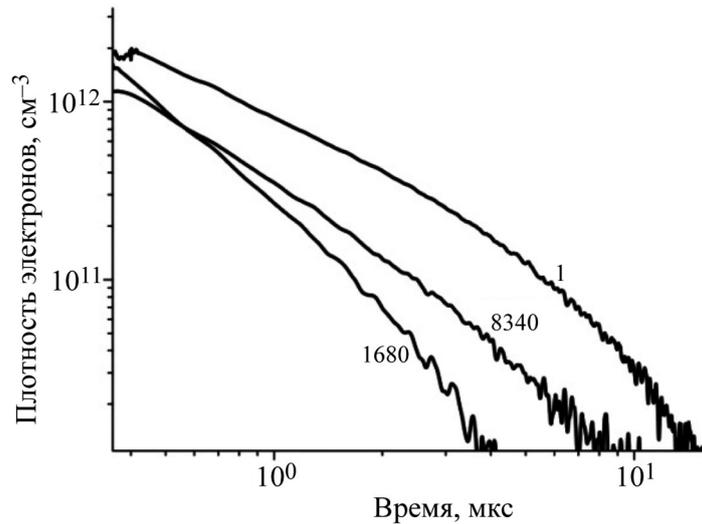


Рис. 2: Эволюция во времени плотности электронов в послесвечении разряда в стехиометрической смеси CH₄:O₂ при 2 Торр после одного, 1680 и 8340 импульсов напряжения.

зависит от числа импульсов. В случае смеси H₂:O₂ скорость распада плазмы монотонно растет с увеличением числа импульсов, достигая насыщения после ~2000 импульсов. Распад плазмы в послесвечении разряда в чистом CH₄ практически не зависит от числа приложенных импульсов.

Наблюдаемые закономерности в горючих смесях связаны с изменением их состава в результате окисления топлива под действием химически активных атомов и радикалов, нарабатываемых в разрядной плазме. При этом метан и кислород превращаются в углекислый газ и пары воды, а водород в смесях с кислородом – просто в пары воды. Также в процессе окисления под действием высоковольтных наносекундных разрядов нарабатывается небольшое количество промежуточных компонентов (CH_2O , CH_3OH и др.) [8, 9].

Изменение состава газовых смесей сказывается на характеристиках газового разряда через изменение электронных свойств – коэффициента ударной ионизации молекул, коэффициентов прилипания электронов к молекулам и электрон-ионной рекомбинации, а также скорости дрейфа электронов в электрическом поле во время разряда. Расчеты энергетического распределения электронов на основе численного решения уравнения Больцмана с учетом рассеяния электронов на основных компонентах смеси (без учета рассеяния на промежуточных компонентах) показали, что все электронные характеристики при окислении меняются монотонным образом. Поэтому немонотонное поведение разрядных характеристик с увеличением числа импульсов напряжения нельзя объяснить простым преобразованием топлива и кислорода в углекислый газ и воду. Есть основания полагать, что принципиальную роль здесь играют электронные процессы с участием промежуточных компонентов. Здесь имеется много соединений с малым потенциалом ионизации, и можно ожидать, что при их наличии меняется ионный состав плазмы. При этом существенного ускорения ударной ионизации не происходит, поскольку разряд в рассматриваемых условиях развивается при больших (в несколько раз выше порога электрического пробоя) электрических полях, и небольшая добавка легкоионизируемой примеси здесь не важна. Однако некоторые промежуточные компоненты (напр., CH_2O) имеют постоянный дипольный момент, заметно превышающий дипольный момент молекул H_2O . При этом могут образоваться большие положительные кластерные ионы, для которых скорость диссоциативной электрон-ионной рекомбинации велика. К тому же могут появиться новые каналы диссоциативного прилипания электронов. В результате при частичном окислении углеводородов могут появиться промежуточные соединения, приводящие к существенному ускорению гибели электронов при распаде плазмы в послесвечении разряда. Также при повторяющихся импульсах напряжения в смеси с промежуточными соединениями, ускоряющими распад плазмы, последующий разряд развивается при меньшей начальной концентрации затравочных электронов, что должно приводить к уменьшению разрядного тока и доли поглощаемой в разряде

энергии (см. рис. 1). При достаточно большом количестве импульсов окисление становится почти полным, когда промежуточные компоненты исчезают. Отсутствие немонотонных зависимостей в характеристиках разряда от числа импульсов для смесей $\text{H}_2:\text{O}_2$ и для чистого метана свидетельствуют о том, что промежуточные компоненты, наработка которых приводит к ускорению гибели электронов, должны содержать углерод и кислород.

Заключение. Проведенные в данной работе эксперименты позволили установить, что ряд характеристик повторяющегося высоковольтного наносекундного разряда ведут себя немонотонным образом при развитии разряда в смеси метана с кислородом. Это относится, прежде всего, к доле поглощаемой в разряде энергии, амплитуде разрядного тока и скорости распада плазмы в послесвечении разряда. Такие закономерности не наблюдались при развитии разряда в смеси водорода с кислородом и в чистом метане. Наблюдаемые зависимости объясняются наработкой в процессе окисления метана промежуточных компонентов, наличие которых может приводить к ускорению распада плазмы и затруднению развития разряда при приложении последующих импульсов напряжения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-12-01051. Авторы благодарны А. Ю. Стариковскому за обсуждение результатов работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. M. Starikovskaia, J. Phys.D: Appl. Phys. **39**, R265 (2006).
- [2] A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, Progr. Energy Comb. Sci. **39**, 61 (2013).
- [3] Y. Ju and W. Sun, Progr. Energy Comb. Sci. **48**, 21 (2015).
- [4] D. V. Zatsepin, S. M. Starikovskaia, and A. Yu. Starikovskii, Combust. Theory Modelling **5**, 97 (2001).
- [5] N. B. Anikin, S. M. Starikovskaia, and A. Yu. Starikovskii, Физика плазмы **30**, 1105 (2004).
- [6] N. B. Anikin, S. M. Starikovskaia, and A. Yu. Starikovskii, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, 3244 (2006).
- [7] N. L. Aleksandrov, S. V. Kindysheva, A. A. Kirpichnikov, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, 4493 (2007).
- [8] J. K. Lefkowitz, P. Guo, A. Rousso, and Y. Ju, Phys. Trans. R. Soc. A **373**, 201403333 (2015).
- [9] N. Tsolas, J. G. Lee, and R. A. Yetter, Phys. Trans. R. Soc. A **373**, 201403344 (2015).

Поступила в редакцию 17 мая 2017 г.