

УДК 621.43.056+519.6

Д-р техн. наук В. А. Богуслаев¹, канд. техн. наук Д. А. Долматов¹АО «Мотор Сич», г. Запорожье²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛЬНОГО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В РЕАГИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Статья посвящена математическому моделированию кинетических механизмов образования окислов азота в теле стабильного дугового разряда малой длины. Рассмотрено влияние важнейших реакций окисления углеводородов и углеводородных радикалов, а также концентрации характерных возбужденных частиц на скорость образования и итоговый выход NO_x . Детально описаны физико-химические механизмы процессов в сильных электромагнитных полях с высоким содержанием активных электронов, рассмотрены основные метастабильные и нестабильные возмущенные состояния одноатомных и двухатомных радикалов. Указан перспективный способ контроля эмиссионных показателей разряда.

Ключевые слова: электрический разряд, энергия электрона, возбужденное состояние, электрохимическая реакция, эмиссия.

В течение последних двух десятилетий электрохимические процессы находят все большее применение в тепловых двигателях и других объектах, использующих в качестве источника тепла химическую энергию реакций сгорания топлива [1, 2]. Можно выделить следующие основные направления работы в данной области: 1) совершенствование процессов воспламенения топлива [3]; 2) стимуляция процесса горения при помощи неравновесной низкотемпературной плазмы разряда [4, 5]; 3) управление характеристиками пламени при помощи наносекундных СВЧ-импульсов [6]; 4) управление характеристиками пламени и скоростью горения при помощи стационарных разрядов [7–9]; 5) видоизменение рабочего процесса горения при помощи электрохимического инициирования локальных детонаций [7, 10, 11]. Все вышеперечисленные методы используют электрические разряды либо импульсы с достаточно высокими энергетическими показателями (до 1 ГДж в случае СВЧ-импульсов, [6]). В случае вынесенного за пределы активной зоны горения разрядника влияние на основной реагирующий поток осуществляется за счет эффекта ионного ветра, поляризации и перестройки течения, электромагнитной диффузии и т.д.; при инфламационном положении разряда либо периодического импульса помимо вышеперечисленных явлений наблюдаются также разнообразные ударные взаимодействия свободных электронов разряда с частицами среды, обладающими высоким реакционным потенциалом. Следует отметить, что электрохимические реакции, обусловленные электронным ударом, наблюдаются и при удаленном положении разряда (исключение со-

ставляет методика, при которой управление потоком осуществляется при помощи допробойных переменных полей [2]), хотя в этом случае в силу значительно меньшей активности молекул среды, более низкой диэлектрической проницаемости и отсутствия свободных радикалов с высоким сродством к электрону или склонностью к ударной ионизации электрохимические процессы гораздо менее интенсивны.

Значительная эмпирическая база данных по интегральным характеристикам электрохимических пламен содержит большое количество полезной информации о базовой структуре гомогенных (и, в меньшей степени, гетерогенных) углеводородо-воздушных и углеводородо-кислородных пламен при различных начальных составах, числах Рейнольдса, АЧХ разряда и т. д. Вместе с тем в настоящее время крайне слабо разработана теоретическая база физико-химических процессов электрохимического горения, необходимая для математического моделирования разрядных устройств. В частности, слабо изучены особенности кинетических механизмов формирования загрязняющих атмосферу веществ – окислов азота и избыточных свободных радикалов. Неоднократно отмечалось, что как традиционный цепной, так и расширенный термический механизмы формирования NO_x , демонстрирующие высокую точность при моделировании разряда в воздухе и термическом горении соответственно, обладают повышенной погрешностью при применении для описания генерации NO_x в теле и окрестности высокоэнергетического разряда [7]. Существенно усложняет процесс моделирования сдвиг медианы распределения энергии актива-

ции для вынужденных возбужденных состояний, особенно сильно проявляющийся в теле стационарного разряда.

В свете всего вышесказанного представляется необходимым математическое моделирование процесса в створе и окрестности стационарного разряда, размещенного в зоне максимума реакций, на основании подробной модели, учитывающей электронные и ионные реакции, свойственные сложным электрохимическим пламенам, а также вклад сил Лоренца и других магнитогидродинамических эффектов в формирование поля параметров. Для установившегося процесса удобно воспользоваться уравнениями движения с нестационарным членом для притока энергии в химических реакциях [6, 12]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m C^i)}{\partial x^i} + \frac{\partial j^i}{\partial x^i} = v_{m\Sigma} \mu_{mp} \quad (1)$$

$$\rho C^i \frac{\partial C^j}{\partial x^i} = \frac{\partial}{\partial x^i} (\tau^{ij} - p g^{ij}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho I^*)}{\partial t} + \rho \sum_{m=1}^{N_f} Q_m^{(t)} + \bar{C}_p T \sum \rho_p M_p v_{p\Sigma} = j^k E^k + \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x^i} - \rho C^i I^* - \sum I_m j_m^i \right) + \frac{\partial}{\partial x^i} (\tau_j^i C^j) - \psi, \quad (3)$$

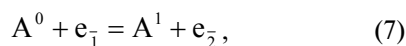
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0, \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}, \quad (5)$$

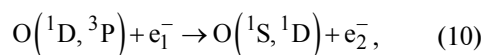
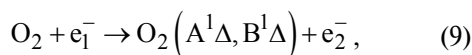
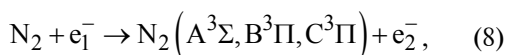
$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \mu_E \vec{C} \times \vec{H}). \quad (6)$$

Вместо генерального баланса реакций, применяемого для исследования структуры реагирующих течений [7], целесообразно использовать упрощенный механизм термического и быстрого формирования оксидов азота, дополненный электрохимическими реакциями различного типа. Наиболее важными при этом являются реакции следующих типов:

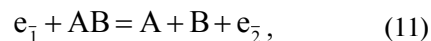
1) Возмущение электронным ударом по механизму



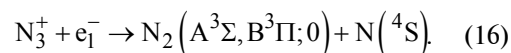
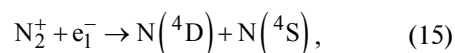
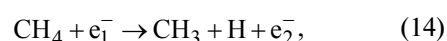
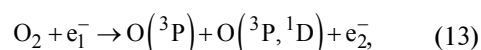
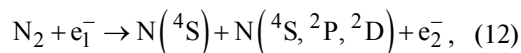
где A^0, A^1 – начальное и конечное состояние частицы, e_1^-, e_2^- – электрон до и после рассеивания частицей. К реакциям данного типа относятся следующие важнейшие электрохимические реакции:



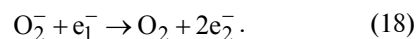
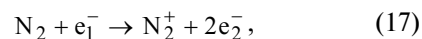
2) Ударная диссоциация нейтральной частицы по механизму



к данному типу реакций относятся многие детерминирующие развитие дополнительных цепей:



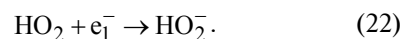
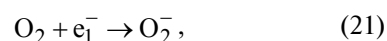
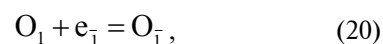
3) Ударная ионизация:



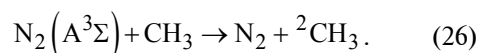
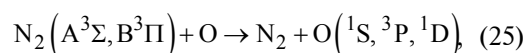
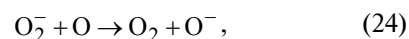
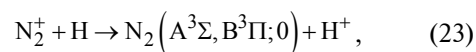
4) Конъюгационная ионизация по механизму



Для разрядов высокой энергии представлена незначительно в силу малого транспортного сечения. Основные реакции данного типа:

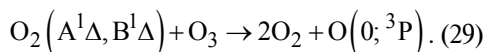
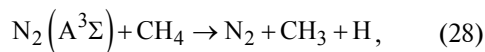
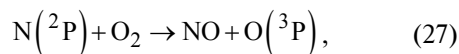


5) Ионная перезарядка (как заряда, так и возбуждения):



Наряду с реакциями возбужденных частиц и ударным возмущением, данный тип взаимодействия является основным источником дополнительных реакционных цепей и, в конечном счете, эмиссионного выхода.

б) Реакции возбужденных частиц



Для определения скоростей соответствующих реакций используется существующая база данных [11] и квантовомеханическая оценка вероятности по величине эффективного сечения:

$$\sigma_i = \int_{\Delta E_D}^{\varepsilon} d\sigma = \frac{\pi q_e^4 (\varepsilon - \Delta E_D)}{\varepsilon^2 \Delta E_D}. \quad (30)$$

Моделирование процессов проводилось для стационарного метано-воздушного пламени с максимальной температурой вне разряда $T = 1950$ К, давление $p = 1$ атм, при вариационной частоте и энергии дугового разряда длиной 5 мм. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.

Традиционное падение выхода оксидов азота при повышении средней энергии электронов разряда выше 105 Гц обусловлено сжиманием эффективных сечений рассеивания, соответствующих инициации дополнительных цепей. Наибольший интерес представляет локальный минимум эмиссии NO_x при частоте разряда 2500 Гц в районе 50–70 эВ. Очевидно, при данных параметрах среды и разряда вследствие изменения суммарного генерального баланса реакций происходит

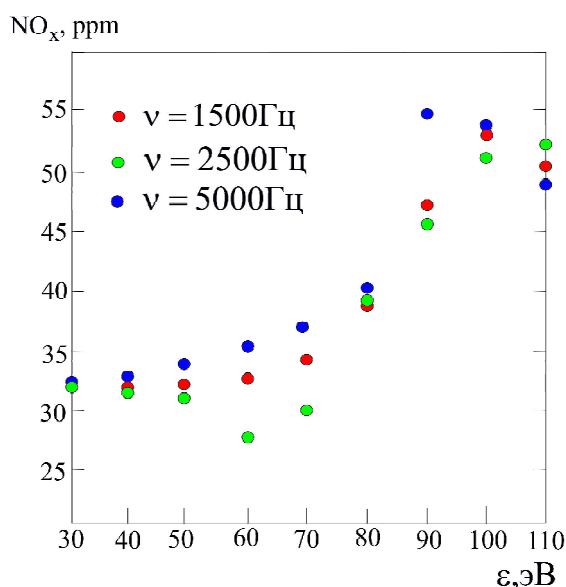


Рис. 1. Генерация NO_x в теле и окрестности разряда

частичная блокировка механизмов, отвечающих за генерацию NO_x – возможно, вследствие оптимума конкурирующих реакций или квантово-механических эффектов, соответствующих данным энергиям электронов. При этом энергетический эффект разряда, а также влияние на поток в целом слабо зависит от частоты в диапазоне до 20 кГц [13].

На основании результатов моделирования можно сделать допущение о возможности существования локального оптимума по эмиссии вредных веществ для большинства стабильных электрических разрядов в теле пламен. С помощью методики исследования электрохимических процессов на основании решения системы уравнений магнитодинамики реагирующей среды для установившихся квазистационарных течений установится возможной оптимизация процесса и существенное (до 35 %) снижение выбросов оксидов азота, обусловленных электромагнитными эффектами.

Список литературы

1. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы / под ред. Л. С. Полака. – М.: Наука, 1971.
2. Galley D. Plasma-enhanced combustion of lean premixed air-propane turbulent flame using a nanosecond repetitively pulsed plasma / D. Galley, G. Pilla, D. Lacosta // AIAA 2005-1193. – Proc. 43rd AIAA Aerospace sciences meeting&exhibit, 2005.
3. Frolov S.M. Ignition and combustion of hydrocarbon fuel drop / S.M. Frolov // Zeldovich Memorial, 2004. Paper № OP-07.
4. Законы горения / под общ. ред. Ю. В. Полежаева. – М.: Энергомаш, 2006. – 352 с.
5. Galley D. Plasma-enhanced combustion of lean premixed air-propane turbulent flame using a nanosecond repetitively pulsed plasma / D. Galley, G. Pilla, D. Lacosta // AIAA 2005-1193. – Proc. 43rd AIAA Aerospace sciences meeting&exhibit, 2005.
6. Иванов О. А. Физико-химические процессы в плазме наносекундных СВЧ-разрядов: дис. докт. физ.-мат. наук: 01.04.08 / О. А. Иванов. – Нижний Новгород, 2007. – 348 с.
7. Долматов Д. А. Регулирование воздушного горения углеводородов разрядами малой длины / Д. А. Долматов // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 41–51.
8. Ganguly B. N. Plasma-assisted improvement of high altitude aerospace vehicle design / B. N. Ganguly // Proc. XV Intern. Conf. Gas Discharge, Toulouse, 2004. – P. 1017.
9. Optimization study of spray detonation initiation by electric discharge / Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. // Proc. 19th

- ICDERS, 2003. P. 44 (Paper N41).
10. Импульсные детонационные двигатели / под общ. ред. С. М. Фролова. — М. : Торус Пресс, 2006. — 592 с.
 11. Долматов Д. А. Перспективные схемы авиационных камер сгорания / Долматов Д. А. // Авиационно-космическая техника и технология. — 2006. — № 7 (21). — С. 36–43.
 12. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 352 с.
 13. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. — Долгопрудный : Изд. Дом. Интеллект, 2009. — 736 с.

Поступила в редакцию 21.11.2011

Богуслаев В.О., Долматов Д.А. Емисійні характеристики стабільного розряду високої енергії у реагуючому потоці

Стаття присвячена математичному моделюванню кінетичних механізмів утворення оксидів азоту у стволі стабільного дугового розряду малої протяжності. Розглянуто вплив головних реакцій оксидзації вуглеводнів та вуглеводневих радикалів, а також концентрації характерних збуджених частинок на швидкість утворення та сумарний вихід NO_x . Детально описано фізико-хімічні механізми процесів в потужних електромагнітних полях з високим вмістом вільних електронів, розглянуто головні метастабільні та нестабільні збуджені стани одно- та двоатомних радикалів. Запропоновано перспективний засіб контролю емісійних показників розряду.

Ключові слова: електричний розряд, енергія електрону, збуджений стан, електрохімічна реакція, емісія.

Boguslaev V., Dolmatov D. Emission characteristics of reaction flow-situated stable high-energy arc

The article consists mathematical model of NO_x creation kinetic mechanism, applied to stable short-length arc. There are studies of summary NO_x output and creation velocity as function of major hydrocarbon and methyl radical reaction, and excited particle concentration. Physical chemistry of strong electromagnetic fields with high consistence of free electron is described, the main methastable and unstable states of monatomic and diatomic radicals was examined. There was offered a perspective method of emission characteristics control.

Key words: electrical discharge, electron energy, excited state, electrochemical reaction, emission.