

УДК 533.92
EDN: IGUNPE

PACS: 52.80.Mg

**Синтез оксидов азота в импульсно-периодическом
диффузном разряде в воздухе***В. С. Курбанисмаилов, П. Х. Омарова, Г. Б. Рагимханов,
Д. В. Терешонок, З. Р. Халикова*

Выполнено численное моделирование по наработке окислов азота NO и NO_2 в импульсно-периодическом режиме в воздухе атмосферного давления для четырех различных временных зависимостей мощности энергоклада. Показана временная динамика температуры в центре разрядного промежутка и абсолютного числа частиц оксидов азота NO и NO_2 . Обнаружено, что число наработанных частиц NO выходит на стационар практически сразу после прекращения действия импульса, в то время как число частиц NO_2 продолжает монотонно расти. Результаты исследований могут быть востребованы в области создания генераторов окислов азота для медицинских приложений.

Ключевые слова: оксиды азота, диффузный разряд, газодинамика, плазмохимия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-63-67

Введение

Высоковольтные импульсные разряды находят широкое применение в различных областях, таких как плазменно-стимулированное горение [1–3], взаимодействие искрового разряда с поверхностью [4–6], плазменная аэродинамика [7, 8]. Отдельно стоит отметить медицину [9] для которой в настоящее время изучаются возможности получения необходимых веществ посредством использования раз-

личных типов разрядов атмосферного давления. Данное обстоятельство требует производить оптимизацию наработки требуемых компонент, конечная концентрация которых может сильно изменяться от типа и параметров разряда при использовании стандартных подходов. Например, ингаляционная терапия осуществляется с использованием оксида азота NO , который нарабатывается в стационарных установках, что автоматически приводит к логистическим проблемам в связи с необходимостью доставки NO к пациенту. Кроме необходимой компоненты NO также могут нарабатываться нежелательные соединения, такие как NO_2 , что ведет к поиску оптимальных условий работы устройства.

Численное моделирование

В настоящей работе на основе ранее разработанной физико-математической модели [11] выполнено одномерное осесимметричное (вдоль радиуса r) численное моделирование наработки окислов азота NO и NO_2 во времени в искровом канале при импульсном воздействии.

Курбанисмаилов Вали Сулейманович¹, профессор, д.ф.-м.н.

Омарова Патимат Хасбулаевна¹, доцент, к.ф.-м.н.

Рагимханов Гаджимирза Балагланович¹, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: gb-r@mail.ru

Терешонок Дмитрий Викторович², с.н.с., к.ф.-м.н.

Халикова Заира Расуловна¹, аспирант.

¹ Дагестанский государственный университет.

Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43 а.

² Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2022 г.

© Курбанисмаилов В. С., Омарова П. Х., Рагимханов Г. Б., Терешонок Д. В., Халикова З. Р., 2022

Подробное описание экспериментальных исследований разряда представлено в [10]. Разряд зажигался в воздухе атмосферного давления при комнатной температуре в импульсно-периодическом режиме. На основе высокоскоростной съемки можно сделать вывод, что область горения разряда представляет собой квазиоднородный цилиндр длиной $L = 4$ мм и радиусом 0,2 мм. Так как наработка NO была линейной от частоты в области частот до 10 кГц, то можно предположить, что образование NO в каждом импульсе не зависит от предыдущего. На основании этого рассматривается одиночный импульс в виде некоторой области энерговыделения в невозмущенном потоке газа с гауссовским профилем мощности вдоль радиуса

$W = W_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$, где $r_0 = 100$ мкм [11]. Величина W_0 определяется из соотношения

$$\int_0^L \left(\int_0^\infty W \cdot 2\pi r dr \right) dx = IU, \text{ что дает } W_0 = \frac{IU}{\pi r_0^2 L},$$

где в течение времени действия импульса $\tau_0 = 5$ мкс значения напряжения и тока есть $U = 400$ В и $I = 0,3$ А соответственно [11]. При этом в [11] было получено удовлетворительное согласие между экспериментом и расчетом по наработке NO .

Для выявления степени влияния временной зависимости мощности разряда на образование окислов азота будем варьировать параметр W_0 таким образом, чтобы вкладываемая энергия оставалась постоянной,

$$\text{т. е. } \int_0^\infty W(t) dt = W_0 \tau_0 = \text{const}. \text{ Для этого рас-}$$

смотрим четыре варианта вариации мощности от времени (рис. 1). Вариант 1, представленный на рис. 1, соответствует ступеньке, которая использовалась в [11] и наиболее близко к эксперименту. Варианты 2 представляет собой линейный спад с временем действия τ_0 . Вариант 3 соответствует меньшему времени энерговыделения $\tau_0/2$, но с большей мощностью $2W_0$. Кривая 4, наоборот, отвечает большему времени действия импульса $2\tau_0$, но с меньшей мощностью $W_0/2$. Расчетное время во всех случаях составляло 100 мкс.

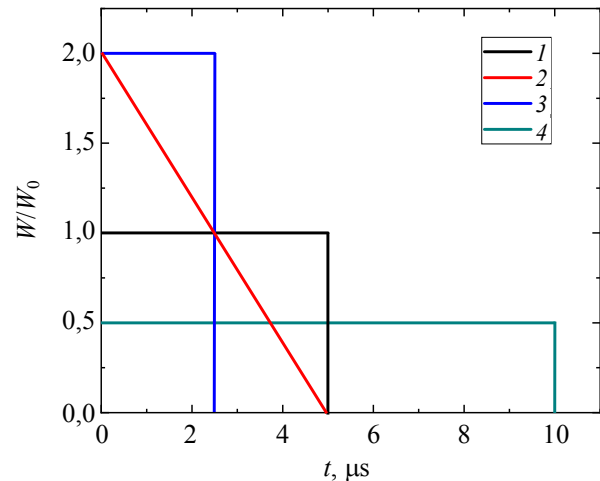


Рис. 1. Вариация мощности от времени

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена динамика наработки общего числа частиц NO и NO_2 во времени, которое определялось как $[NO] = 2\pi L \int_0^\infty n_{NO} r dr$ и $[NO_2] = 2\pi L \int_0^\infty n_{NO_2} r dr$, где n_{NO} и n_{NO_2} — концентрации NO и NO_2 вдоль радиуса разрядного канала. При этом наблюдается принципиальное отличие в рамках используемой модели. Если общее число частиц NO выходит практически на стационар после прекращения действия импульса для каждого из четырех вариантов энерговыклада, то для NO_2 продолжается монотонный линейный рост.

При сравнении рис. 1 и рис. 2 можно сделать вывод, что максимальный выход оксидов азота NO и NO_2 достигается для энерговыделения растянутого во времени, то есть для случая 4 (рис. 1). Такое поведение, по всей видимости, обусловлено временной динамикой температуры газа T_g (рис. 3). Очевидно, что при дальнейшем уменьшении мощности (при сохранении вложенной энергии) может наблюдаться недостаточный нагрев для образования атомов кислорода и азота для последующего участия в реакциях с образованием NO . Соответственно есть некое значение мощности, при которой достигается максимальный выход NO . В работе [12] было отмечено, что максимальное значение NO при атмосферном давлении соответствует области температур $T_g = 3500 \div 4000$ К. Данный вывод

хорошо согласуется с результатами настоящей работы. В соответствии с рис. 3 максимальный временной интервал в течение которого $T_g = 3500 \div 4000$ К соответствует режиму 4 (рис. 1), где и наблюдается наибольший выход

NO . В связи с этим целесообразна разработка импульсно-периодических источников питания, способных обеспечить максимальную продолжительность температуры газа в плазменном канале на уровне $3500 \div 4000$ К.

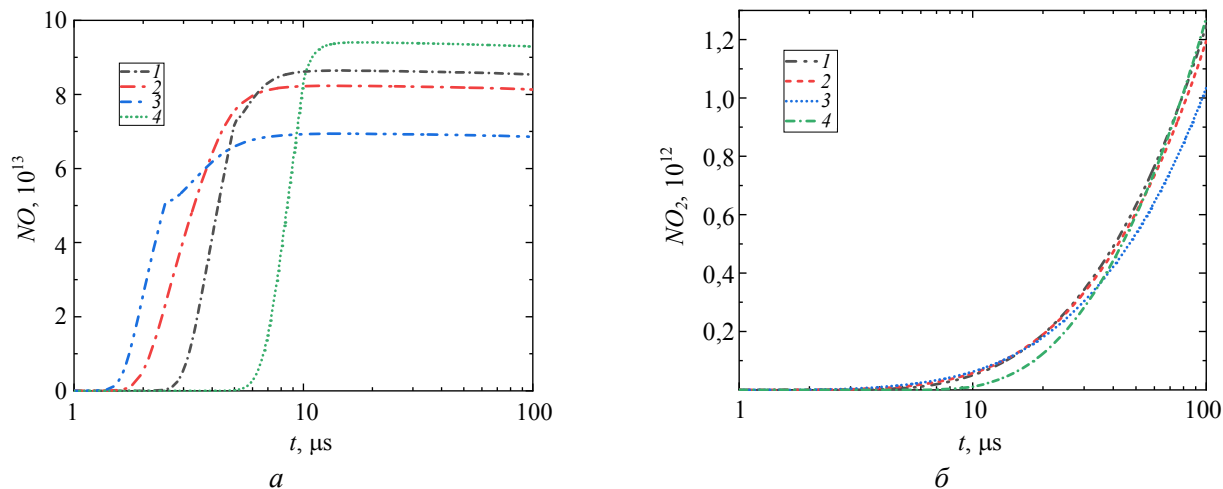


Рис. 2. Общее число наработанных частиц: а) NO и б) NO_2 . Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют форме энерговыделения рис. 1

При увеличении температуры газа происходит разрушение NO в результате столкновения с атомами кислорода и азота. В соответствии с кинетической схемой, представленной в [11], только одна реакция отвечает за наработку NO_2 в трехчастичном столкновении с участием атомарного кислорода и NO . При этом константа такой реакции растет с уменьшением температуры. Этим и объясняется монотонный рост NO_2 в течение всего времени счета. Нарботка NO_2 прекратится, когда закончится атомарный кислород в результате образования молекулярного кислорода.

Стоит отметить, что в соответствии с результатами настоящего расчета наиболее близкое к эксперименту значение по NO достигается для случая, когда энерговыделение «сжато» во времени. Но при этом максимальная эффективность с точки зрения энергозатрат отвечает «растянутому» во времени вложению энергии, так как общая энергия не изменяется, а абсолютное число наработанных частиц растет.

Наибольшее значение температуры достигается для случая, соответствующего варианту 3 энерговклада (рис. 1). При этом наблюдается не только существенно больший рост температуры во времени, но и максимальная

скорость охлаждения после прекращения действия импульса, что обусловлено интенсивным газодинамическим расширением плазменного канала, что также в свою очередь уменьшает наработку оксидов азота, в результате уменьшения концентрации реагирующих компонентов.

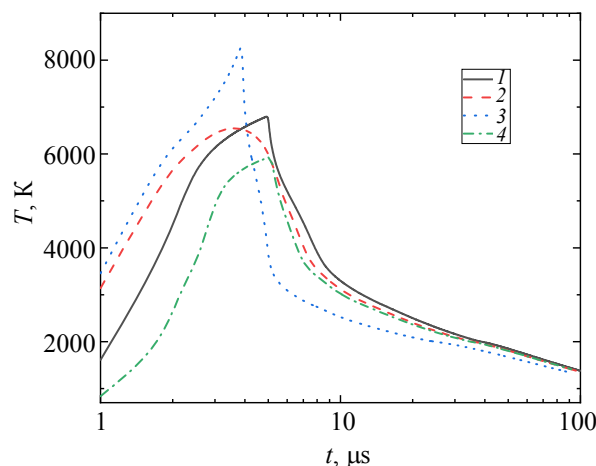


Рис. 3. Динамика температуры в центре разрядного промежутка. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют форме энерговыделения рис. 1

Заключение

В настоящей работе, на основе ранее разработанной физико-математической моде-

ли диффузного импульсного разряда в воздухе атмосферного давления, выполнено численное моделирование наработки оксидов азота NO и NO_2 . Показано, что существует оптимальный режим, характеризующийся временем воздействия и мощностью энергоклада, обеспечивающий температуру газа в плазменном канале на уровне $3500\div 4000$ К и способствующий максимально возможному образованию NO и NO_2 . При этом возможна минимизация энергозатрат при неизменной вкладываемой энергии в импульс. Представленные результаты могут быть востребованы в области разработки и создания импульсно-периодических генераторов по наработке оксидов азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (проект № 20-08-01043).

ЛИТЕРАТУРА

1. Starikovskaia S. M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39. P. R265.

2. Starikovskiy A., Aleksandrov N. // Prog. Energy Combust Sci. 2013. Vol. 39. P. 61.

3. Ju Y., Sun W. // Prog. Energy Combust Sci. 2015. Vol. 48. P. 21.

4. Алмазова К. И., Амирова А. А., Белоногов А. Н., Боровков В. В., Рагимханов Г. Б., Терешонок Д. В., Тренькин А. А., Халикова З. Р. // ПЖТФ. 2021. Т. 46. С. 8.

5. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Kurbanismailov V. S., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Trenkin A. A. // EPL. 2020. Vol. 130. P. 65002.

6. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Trenkin A. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. P. 095020.

7. Голуб В. В., Савельев А. С., Сеченов В. А., Сон Э. Е., Терешонок Д. В. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 6. С. 903.

8. Son E., Tereshonok D. // EPL. 2012. Vol. 99. P. 15002.

9. Malik M. A. // Plasma Chem. Plasma Process. 2016. Vol. 36. P. 737.

10. Буранов С. Н., Горохов В. В., Карелин В. И., Селемир В. Д., Ширишин А. С. // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 5. С. 755.

11. Бабаева Н. Ю., Буранов С. Н., Найдис Г. В., Рагимханов Г. Б., Селемир В. Д., Терешонок Д. В., Тренькин А. А., Халикова З. Р., Ширишин А. С. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 11.

12. Грицинин С. И., Князев В. Ю., Косый И. А., Попов Н. А. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 1.

PACS: 52.80.Mg

Operating time of nitrogen oxides in pulse-periodic diffuse discharge

V. S. Kurbanismailov¹, P. H. Omarova¹, G. B. Ragimkhanov¹, D. V. Tereshonok²
and Z. R. Khalikova¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala
43-a Gadzhiyev st., Makhachkala, the Republic of Dagestan, 367000, Russia
E-mail: gb-r@mail.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

Received October 25, 2022

Numerical modeling of the production of nitrogen oxides NO and NO_2 in a repetitively pulsed mode in air at atmospheric pressure was performed for four different time dependences of the energy input power. The temporal dynamics of the temperature in the center of the discharge gap and the absolute number of particles of nitrogen oxides NO and NO_2 are shown. It has been found that the number of produced NO particles reaches a steady state almost immediately after the pulse stops, while the number of NO_2 particles continues to grow monotonically.

The research results may be in demand in the field of creating nitrogen oxide generators for medical applications.

Keywords: nitrogen oxides, diffuse discharge, gas dynamics, plasma chemistry.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-63-67

REFERENCES

1. S. M. Starikovskaia, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, R265 (2006).
2. A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, Prog. Energy Combust Sci. **39**, 61 (2013).
3. Y. Ju and W. Sun, Prog. Energy Combust Sci. **48**, 21 (2015).
4. K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, V. S. Kurbanismailov, G. B. Ragimkhanov, A. A. Tren'kin, D. V. Tereshonok and Z. R. Khalikova, Tech. Phys. Lett. **47**, 71 (2021).
5. K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, V. S. Kurbanismailov, Z. R. Khalikova, G. B. Ragimkhanov, D. V. Tereshonok and A. A. Trenkin, EPL **130**, 65002 (2020).
6. K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, Z. R. Khalikova, G. B. Ragimkhanov, D. V. Tereshonok and A. A. Trenkin, Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 095020 (2021).
7. V. V. Golub, A. S. Saveliev, V. A. Sechenov, E. E. Son and D. V. Tereshonok, High Temp. **48**, 903 (2010).
8. E. Son and D. Tereshonok, EPL **99**, 15002 (2012).
9. M. A. Malik, Plasma Chem. Plasma Process. **36**, 737 (2016).
10. S. N. Buranova, V. V. Gorokhova, V. I. Karelina, V. D. Selemir and A. S. Shirshin, Technical Physics **65** (5), 723 (2020).
11. N. Y. Babaeva, S. N. Buranov, G. V. Naidis, G. B. Ragimkhanov, V. D. Selemir, D. V. Tereshonok, A. A. Trenkin, Z. R. Khalikova and A. S. Shirshin, Plasma Phys. Rep. **48**, 11 (2022) [in Russian].
12. S. I. Gritsinin, V. Y. Knyazev, I. A. Kossyi and N. A. Popov, Plasma Phys. Rep. **32**, 520 (2006).