

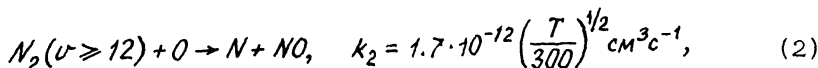
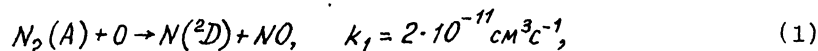
01; 04; 09

© 1990

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНО- И ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ МОЛЕКУЛ АЗОТА НА СИНТЕЗ O_3 И NO ПРИ СВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

В.Ф. Л а р и н

В лабораторном эксперименте [1] исследовался процесс генерации озона и азотных окислов при многократном СВЧ разряде в воздухе. Поскольку основным продуктом плазмохимических реакций явились азотные окислы, которые интенсивно уничтожают озон, был поставлен вопрос об экологической опасности проектов создания искусственной ионизированной области (ИИО) в атмосфере с помощью СВЧ разрядов [2]. С другой стороны, численное моделирование показало, что при малой длительности воздействия, характерной для создания и поддержания ИИО, основным продуктом является озон [3, 4]. Возможность преимущественной генерации озона упоминалась и в [1], однако без численных оценок. Также без количественных оценок в [5] указано на определяющую роль реакций с участием возбужденных молекул азота



$N_2(A)$ – азот в электронно-возбужденном состоянии $A^3 \sum_u^+$, T – кинетическая температура газа. Важность реакций (1)–(2) определяется большими значениями их скоростей k_1, k_2 . В настоящей работе роль этих реакций рассматривается более детально при учете других, конкурирующих процессов.

Для численных оценок нам понадобятся значения параметров ИИО и некоторых кинетических констант. Они находятся из оптимальных условий пробоя [2] и численного решения кинетического уравнения [6]. Электронная концентрация

$$n_e \approx 3 \cdot 10^{-24} n_m^2, \quad (3)$$

где n_m (см^{-3}) – концентрация нейтралов. Скорость протекания химических реакций сильно зависит от кинетической температуры газа, которая может повышаться даже при однократном воздействии СВЧ импульсом [7]. Большая часть поглощаемой энергии уходит на колебательное и электронное возбуждение молекул и не всегда

используются для релаксации в тепловую, влияя, тем не менее, на химические процессы через реакции типа (1)–(2). Следуя [4], определим время нагрева τ_H как время, за которое энергия молекул увеличивается на 10%. Для напряженности электрического поля $E = E_K$, где E_K – критическое поле пробоя в непрерывном режиме,

$$\tau_H \approx \frac{10^{29}}{n_m^2}. \quad (4)$$

Время воздействия СВЧ излучением на газ τ можно получить, используя характерные значения скорости ветра 10–20 м/с и параметры ИИО и режимы их поддержания, приведенные в [2]. Оценки показывают, что $\tau \lesssim \tau_H$ для высот $z \gtrsim 40$ км.

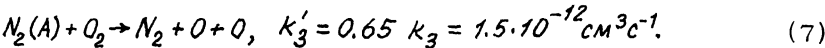
Скорость заселения $A^3 \Sigma_u^+$, рассчитанная, согласно [6], при $E = E_K$, равна

$$\alpha_A = (2-7) \cdot 10^{-10} n_e n_m. \quad (5)$$

Меньшее значение соответствует прямому возбуждению $A^3 \Sigma_u^+$ электронным ударом, большее – суммарному, с учетом вышележащих состояний, в предположении, что они полностью перейдут в $A^3 \Sigma_u^+$. Из (3)–(5) получаем, что относительная заселенность $A^3 \Sigma_u^+$ при $\tau \lesssim \tau_H$

$$\frac{[N_2(A)]}{n_m} \lesssim 10^{-4}. \quad (6)$$

Возможные пути и скорости гашения $A^3 \Sigma_u^+$ приведены в [8]. Реакция (1) при этом далеко не самая определяющая. Наиболее существенно гашение на молекулярном кислороде. Здесь имеется несколько каналов и при общей скорости $k_3 = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ для нулевого колебательного уровня 65% выход имеет реакция



Выход атомарного кислорода при СВЧ разряде в воздухе за счет (7) выше, чем при диссоциации O_2 электронным ударом [9]. Концентрация NO , образованной при действии (1), (7), с учетом (3)–(6) составит

$$\frac{[NO]}{n_m} = \frac{k_1 k_3'}{k_3^2} \frac{[N_2(A)]^2}{n_m^2} \lesssim 6 \cdot 10^{-8}.$$

Количество NO , образуемой в СВЧ разряде за счет других каналов, существенно больше [3, 4].

Для оценки влияния колебательного возбуждения используем упрощенную модель, включающую реакцию (2), а также R6–R8 в обозначениях [4]:

$$N + O_2 \rightarrow NO + O, \quad k_4 = 5.5 \cdot 10^{-12} \exp\left(-\frac{3220}{T}\right), \quad (8)$$

$$N + NO \rightarrow N_2(\nu) + O, \quad k_5 = 8.2 \cdot 10^{-11} \exp\left(-\frac{410}{T}\right), \quad (9)$$

$$N + O_3 \rightarrow NO + O_2, \quad k_6 = 5 \cdot 10^{-12} \exp\left(-\frac{650}{T}\right). \quad (10)$$

Молярный азот, образуемый в реакции (9), находится в колебательно-возбужденном состоянии преимущественно с $\nu = 4$. Реакция (9) является обратной по отношению к (2) и, кроме того, конкурирует с (8), (10) в процессе трансформации атомарного азота.

Вопросы синтеза окиси азота при неравновесном СВЧ разряде в воздухе рассматривались в [10]. Показано, что для наибольшей эффективности этого процесса необходимо, во-первых, достичь достаточно высокой колебательной температуры азота $T_\nu > 2500$ К. Это возможно при удельном энергокладе $W > 1 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{атм}}$. Во-вторых, необходимо подавить действие обратной реакции (9), ускорив реакцию (8) за счет повышения поступательной температуры до 1000 К или колебательной температуры кислорода до 5000 К. В нашем случае ситуация противоположна. Предполагая $\tau \approx \tau_H$, мы автоматически имеем при $T = 230$ К $W < 10^{-2} \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{атм}}$. Если вся дополнительная энергия уходит на возбуждение колебательных уровней азота, то для колебательной температуры получаем по формуле Планка $T_\nu = 720$ К. Оценка с использованием распределения молекул по колебательным уровням [10] дает

$$\frac{[N_2(\nu \geq 12)]}{[N_2]} \approx 10^{-20}.$$

Очевидно, что при таком содержании возбужденных молекул реакцией (2) можно пренебречь. В результате действия реакций (8)–(10) образуется окись азота [4]:

$$[NO] = \frac{k_4}{k_5} [O_2] + \frac{k_6}{k_5} [O_3]. \quad (11)$$

Таким образом, если при создании ИИО выдерживать режим с малой длительностью воздействия, влиянием колебательно-возбужденных молекул на плазмохимические процессы можно пренебречь. Учет электронно-возбужденных молекул N_2 (А) приводит к увеличению концентрации атомарного кислорода, который полностью конвертируется в озон [4] и пропорциональному увеличению, согласно (11), окиси азота. Что касается результатов эксперимента [1], то следует отметить его сильное отличие от режимов создания

ИИО, предусматриваемых в [2], и, наоборот, близость оптимизальным условиям синтеза NO , полученным в [10]. В первую очередь это касается давления газа - в [1] использованы $p \geq 70$ Тор, что соответствует $z < 20$ км. Во-вторых, длительность и интенсивность воздействия - даже при одиночном импульсе в эксперименте [7], проведенном в сходных условиях, обеспечивался удельный энерговыход $W \approx 2.5 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \text{ атм}}$, а в [1] накапливали до 1000 импульсов. Заметим также, что, согласно [7], идет быстрый нагрев газа со скоростью $\approx 10-15$ К/мкс.

Влияние окиси азота на озон неоднозначно и зависит от ряда фотохимических, радиационных и динамических факторов. Учитывая связующую роль азотных окислов для фреонов, о чем упоминалось в [1], представляет интерес задача глобального моделирования с учетом процессов переноса и химических процессов с участием малых составляющих атмосферы, аналогичного, например, [11, 12].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А с к а р ь я н Г.А., Б а т а н о в Г.М., К о с с ы й И.А., К о с т и н с к и й А.Ю. // ДАН СССР, 1988. Т. 302. № 3. С. 566-570.
- [2] Б о р и с о в Н.Д., Г у р е в и ч А.В., М и л и х Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986, 184 с.
- [3] Л а р и н В.Ф., Р у м я н ц е в С.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 6. С. 87-90.
- [4] Л а р и н В.Ф., Р у м я н ц е в С.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 12. С. 1273-1279.
- [5] A s k a r' y a n G.A., B a t a n o v G.M., K o s s y i I.A. IV Intern. Workshop Nonl. Turb. Processes in Phys. V. 2. Kiev. 1989. P. 65-68.
- [6] Л а р и н В.Ф. Численное моделирование функции распределения электронов и кинетических коэффициентов слабоионизированной молекулярной плазмы, находящейся в переменном электрическом поле. Препринт ПГИ-86-08-52. Апатиты, 1986. 23 с.
- [7] Б е р д ы ш е в А.В., В и х а р е в А.О., Г и т л и н М.С. и др. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 661-666.
- [8] F r a s e r M.E., P i p e r L.G. // J. Phys. Chem. 1989. V. 93. N 3. P. 1107-1111.
- [9] А л е к с а н д р о в Н.Л., К о н ч а к о в А.М. В кн.: Всес. сов. „Высокочастотный разряд в волновых полях“. Тез. докл., Куйбышев, 1989. С. 23.
- [10] Р у с а н о в В.Д., Ф р и д м а н А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 416 с.

- [11] Демин И.Г., Гинзбург Э.И. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. С. 563-572.
- [12] Brasseur G., Hitchman M.H., Simon P.C., De R.A. // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. N 12. P. 1361-1364.

Поступило в Редакцию
14 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 8

26 апреля 1990 г.

01; 04

© 1990

К ТЕОРИИ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ БЫСТРЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

В.С. Воробьев, А.Д. Рахель

Построено автомодельное решение начальной стадии быстрых режимов электрического взрыва проводников. Дано объяснение ранее известным из эксперимента зависимостям времени до начала интенсивного расширения металла (взрыва) и так называемому интегралу действия от параметров внешней электрической цепи и размеров проводника.

Рассмотрим разряд батареи конденсаторов емкостью C_0 на тонкую металлическую проволоку радиусом a_0 и длиной $l(a_0 \ll l)$. Как показывают результаты численного моделирования и экспериментальные исследования, существуют режимы электрического взрыва, названные быстрыми, для которых скин-эффект несуществен, а процесс нагрева и расширения металла может быть описан в рамках одномерной МГД-динамики. Уравнения движения в этом случае имеют вид [1]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rho r v &= 0, \\ \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{c} - j H_{\varphi}, \\ \rho T \frac{dS}{dT} &= \epsilon E_z^2, \end{aligned} \quad (1-3)$$

где E_z и H_{φ} — напряженности электрического и магнитного полей соответственно (геометрия Z-пинча); v — радиальная компонента