

- [1] Б о ч а р о в Ю.В., В у ж в а А.Д. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 16. С. 1460-1462.
- [2] А к о п я н Р.С., А л а в е р д я н Р.Б., Ч и л и н г а - р я н Ю.С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 14. С. 858-862.
- [3] M i y a n o К., S h e n Y.R. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 9. P. 473-475.

Акустический институт  
им. Н.Н. Андреева,  
Москва

Поступило в Редакцию  
16 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 6  
01; 03; 04

26 марта 1989 г.

### КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА И ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

В.Ф. Л а р и н, С.А. Р у м я н ц е в

Электрический разряд в кислороде приводит к диссоциации молекул и практически полной конверсии образованного атомарного кислорода, в озон [1]. В воздухе, кроме кислорода диссоциирует азот, приводя к образованию окислов азота, разрушающих озон. Лабораторные эксперименты, в которых разряд в воздухе осуществлялся длительной последовательностью мощных СВЧ импульсов, показывают, что при этом производство окислов азота превалирует над образованием озона [2], и ставят вопрос об оптимизации параметров воздействующего импульса и состояния газа, направленной на увеличение выхода озона и уменьшение - окислов азота. Актуальность вопроса обусловлена многолетним уменьшением содержания озона в атмосфере [3] и необходимостью исследования возможностей его искусственного воспроизводства.

В данной работе выполнено численное моделирование кинетики плазмохимических процессов в разряде, вызванном одиночным СВЧ импульсом в воздухе на высотах стратосферы. Резкое различие в характерных временах процессов при СВЧ разряде позволяет разделить задачу на три этапа. На первом этапе импульс первичного пробоя, для которого выполняются оптимальные условия ионизации [4] (частота волны  $f = 10$  ГГц для высоты 30 км, амплитуда электрического поля  $E_1 \approx 5 E_k$ ,  $E_k$  - критическое поле пробоя), за время  $\sim 10^{-8}$  с создает концентрацию электронов около 10% от критической концентрации  $n_c$  для частоты  $f$  [4]:  $n_e = 10^{11} \text{ см}^{-3} \approx 0.1 n_c$ . На втором этапе созданная ионизированная область подвергается воздействию поддерживающего СВЧ импульса

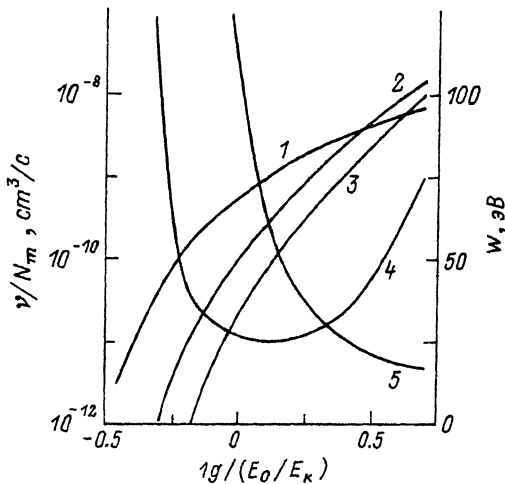


Рис. 1. Зависимость частот образования  $\nu$  (кривая 1 - O, 2 -  $N(^4S)$ , 3 -  $N(^2D)$ ) и энергетической цены  $W$  атома кислорода (кривая 4) и азота (5) от напряженности поля  $E_0$ .

длительностью  $\tau$  и амплитудой  $E_0 \sim E_k$ . Образованные горячие электроны производят возбуждение и диссоциацию основных молекулярных составляющих воздуха  $N_2$ ,  $O_2$ , в результате чего возникают химически активные атомы  $N$  и  $O$ . На третьем этапе, после окончания поддерживающего импульса, продолжается химическая эволюция с участием  $O$ ,  $N$  и других составляющих, приводящая к образованию озона и окислов азота.

Частоты возбуждения и диссоциации молекул  $O_2$ ,  $N_2$  при различных значениях поля  $E_0$  вычислялись, используя решение кинетического уравнения для функции распределения электронов в высокочастотном поле [5] и сечения возбуждения и диссоциации электронным ударом [6, 7]. Эволюция состава воздушной смеси описывалась системой уравнений химической кинетики для основных состояний компонент  $O$ ,  $N$ ,  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$  и возбужденных состояний  $O_2(a^1\Delta_g)$ ,  $N(^2D)$ , взаимодействующих друг с другом и с  $N_2$ ,  $O_2$  в 14 реакциях, наиболее существенных для образования и распада озона и окислов азота по данным [1, 8, 9].

На рис. 1 представлены зависимости частот образования атомов  $N$ ,  $O$ , нормированных на концентрацию молекул воздуха  $N_m$ , и энергетической цены образования  $N$ ,  $O$  от величины  $E_0$ . Энергетическая цена определяется как отношение поглощенной энергии СВЧ поля к количеству образованных атомов. Видно, что при значениях поля  $E_0 \lesssim E_k$  образование атомов  $N$  существенно затруднено по сравнению с образованием  $O$ , что отражает разницу в энергетических порогах диссоциации  $N_2$  ( $\approx 10$  эВ) и  $O_2$  ( $\approx 5$  эВ) [6, 7].

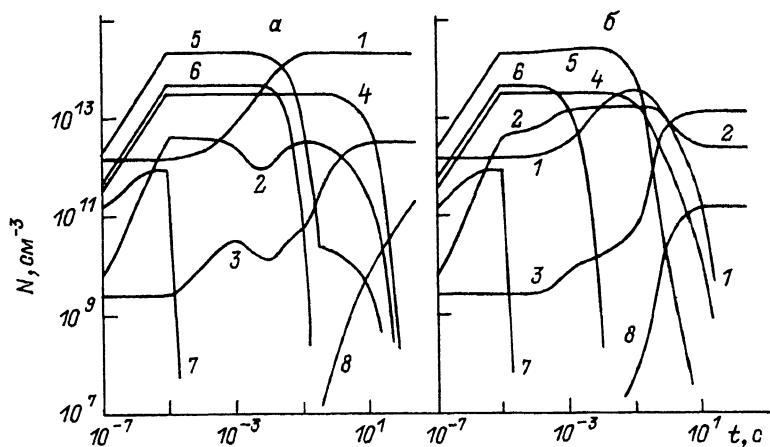


Рис. 2. Эволюция концентраций составляющих газовой смеси: кривая 1— $O_3$ , 2 —  $NO$ , 3 —  $NO_2$ , 4 —  $O_2$  ( $\alpha^1 4g$ ), 5 —  $O$ , 6 —  $N$ , 7 —  $N(^2D)$ , 8 —  $NO_3$  для значений температуры газа 220 К (а), 500 К (б);  $\tau = 10^{-5}$  с,  $E_0 = E_k$ .

Зависимость концентраций компонент, образующихся в разряде, от времени приведена на рис. 2 для двух значений температуры газа  $T=220$  К (рис. 2, а),  $T=500$  К (рис. 2, б). Начальные значения концентраций различных компонент соответствуют условиям в атмосфере на высоте 30 км, в том числе начальное отношение концентраций окислов азота и озона  $\delta_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ . Расчеты для двух значений температуры иллюстрируют влияние нагрева газа СВЧ импульсом на химическую эволюцию состава: первое значение соответствует ситуации, когда нагрев незначителен, второе — сильному нагреву [10]. Приведенные на рис. 2, а графики показывают, что при низкой температуре газа атомарный кислород полностью преобразуется в озон, за время  $t \approx 100$  с основными продуктами становятся озон и окислы азота  $NO_2$ ,  $NO_3$ . Концентрация озона увеличивается при этом в  $\Delta = 200$  раз, величина  $\delta$  возрастает от начального значения  $\delta_0$  до  $\delta = 1.6 \cdot 10^{-2}$ . После  $t \approx 100$  с эволюция состава определяется взаимодействием озона с двуокисью азота  $NO_2$ . В случае высокой температуры (рис. 2, б) падает скорость образования озона, растут скорости образования окислов азота и в финальной стадии эволюции озон полностью уничтожается взаимодействием с  $NO$ . Основными продуктами процесса являются окислы азота, что соответствует  $\delta \rightarrow \infty$ . Учитывая зависимости, приведенные на рис. 1, можно было ожидать, что при  $E_0 < E_k$   $\delta$  будет уменьшаться вследствие роста энергетической цены атома азота, т.е. как результат более интенсивного образования атомов  $O$  по сравнению с атомами  $N$  в ходе поддерживающего импульса. Расчеты показывают, что изменение  $\delta$

происходит лишь в случае высокой температуры газа. Например, для значений  $E_0 = 0.5 E_k$ ,  $\tau = 10^{-5}$  с,  $T = 220$  °К получены величины  $\Delta = 13$ ,  $\delta = 1.6 \cdot 10^{-2}$ , при  $T = 500$  оК соответственно  $\Delta = 7.4$ ,  $\delta = 8 \cdot 10^{-2}$  (по сравнению с  $\delta \rightarrow \infty$  для  $E_0 = E_k$ ). Здесь проявляется нелинейность уравнений химической кинетики, приводящая к тому, что изменение начальных условий в широких пределах приводит к малоотличающемуся конечному результату.

Полученные результаты показывают, что одним из основных факторов, влияющих на соотношение концентраций озона и окислов азота, образующихся под действием СВЧ импульса в атмосфере, является температура газа. Короткий импульс, при котором нагрев незначителен, приводит к образованию озона и окислов азота в соотношении, сравнительно близком к существующему в естественных условиях  $\delta_0 \sim (1-5) \cdot 10^{-3}$ , что подтверждает предположение [2] о преимущественном образовании озона одиночным импульсом. Длинный импульс, приводящий к значительному нагреву газа, сдвигает процесс в сторону преимущественного образования окислов азота ( $\delta \rightarrow \infty$ ).

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Захаров А.И., Клоповский К.С., Осипов А.П. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 3. С. 327-333.
- [2] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Коссы И.А., Костинский А.Ю. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 3. С. 566-569.
- [3] Kerr R.A. // Science. 1988. V. 239. N 4847. P. 1489-1491.
- [4] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: 1986. 184 с.
- [5] Ларин В.Ф. // Препринт ПГИ-86-08-52. Апатиты. 1986. 23 с.
- [6] Иванов Г.А., Конахина А.И., Иванов В.Е. // Препринт ПГИ-83-10-29. Апатиты. 1984. 42 с.
- [7] Кириллов А.С., Конахина А.И., Иванов Г.А., Иванов В.Е. // Препринт ПГИ-84-05-33. Апатиты. 1984. 63 с.
- [8] Johnston H.S., Podolske J. // Rev. Geophys. Space Sci. 1978. V. 16. N 4. P. 491-519.
- [9] Torr M.R., Torr D.G. // Rev. Geophys. Space Sci. 1982. V. 20. N 1. P. 91-144.
- [10] Вихарев А.Л., Гитлин М.С., Иванов О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 4. С. 223-226.

Поступило в Редакцию  
3 февраля 1989 г.