

04

© 1990 г.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ СВЧ ВОЛНОВЫМ ПУЧКОМ

Г. А. Аскарьян, Г. М. Батанов, С. И. Грицинин, И. А. Косский,  
А. Ю. Костинский

Рассматриваются плазмохимические процессы окисления азота и образования озона, сопровождающие СВЧ разряд в сухом воздухе и смесях азота с кислородом. Определяются степень окисления азота и необходимые энергетические затраты на образование окислов в зависимости от условий протекания разряда. Результаты экспериментов находят качественное объяснение при учете реакций окисления электронно-возбужденных метастабильных молекул азота атомами кислорода. Низкие концентрации озона в разряде свидетельствуют о значительном энерговкладе в газ.

### Введение

СВЧ разряды — один из наиболее распространенных способов возбуждения газовых сред в плазмохимических реакторах [1]. Как правило, схема разрядного устройства использует ввод прокачиваемых рабочих газовых смесей через трубки в разрядный волноводный тракт. Новые перспективы в плазмохимических приложениях открывают пучковый (сходящийся пучок СВЧ волн) способ генерации плазмы в открытом пространстве вдали от стенок камеры [2-5], что исключает влияние на характеристики разряда и на ход химических реакций материала контактирующих с плазмой стенок или электродов. Расширение области ионизации от места первоначального пробоя (фокус пучка) навстречу СВЧ излучению (волна ионизации [6]) делает возможным ввод в разряд значительных объемов газовой смеси.

\* Именно пучковый способ передачи и утилизации СВЧ энергии и использован в настоящей работе, посвященной плазмохимии разрядов в смесях азот—кислород.

К числу основных в исследовании относятся задачи определения каналов химических реакций и построения плазмохимической модели СВЧ пучкового разряда высокого давления ( $\nu_{\text{eff}} \gg \omega$ ), возбуждаемого при относительно малой исходной величине параметра  $E/n_m$  ( $E/n_m \approx 2-6 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ ,  $E$  — электрическое поле СВЧ волны,  $n_m$  — концентрация молекул рабочего газа,  $\nu_{\text{eff}}$  — эффективная частота соударений электрон—нейтрал,  $\omega$  — угловая частота СВЧ излучения).

Характерным свойством таких разрядов, исследованных в цикле экспериментальных работ [6-8], является их сильная пространственная неоднородность — наличие областей контракции («нитей» или «каналов»), отличающихся чрезвычайно высокой концентрацией электронного компонента и относительно большой электронной и газовой температурами, и околочанальной холодной разреженной плазмы («ореола»). Параметр  $E/n_m$  в развитом разряде принимает значения от исходного («вакуумного») в межканальной среде до  $\gg 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{см}^2$  в области каналов. Соответственно в захваченном разрядом объеме существует неоднородность условий протекания химических реакций (на что обращалось внимание в ранней работе [4], посвященной плазмохимическим проблемам раз-

ложения  $\text{CO}_2$ ). Особенность протекания химических реакций может быть связана не только непосредственно с горячими центрами, но и с сильным УФ излучением, исходящим от них (СВЧ фотохимия).

Кроме того, СВЧ химия в пучке в свободном пространстве позволяет более уверенно моделировать процессы, протекающие при СВЧ разряде в атмосфере и стратосфере [9], и анализировать их экологические последствия [10, 11].

### Схема эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Импульсное СВЧ излучение с длиной волны  $\lambda_f \approx 2.5$  см, мощностью  $P = 50-200$  кВт, длительностью  $\tau_f \approx 5-100$  мкс и частотой посылок  $f = 0.1-50$  Гц вводилось в металлическую камеру 3 и фокусировалось полистироловой линзой 2 в пятно радиусом  $\sim \lambda_f$ .

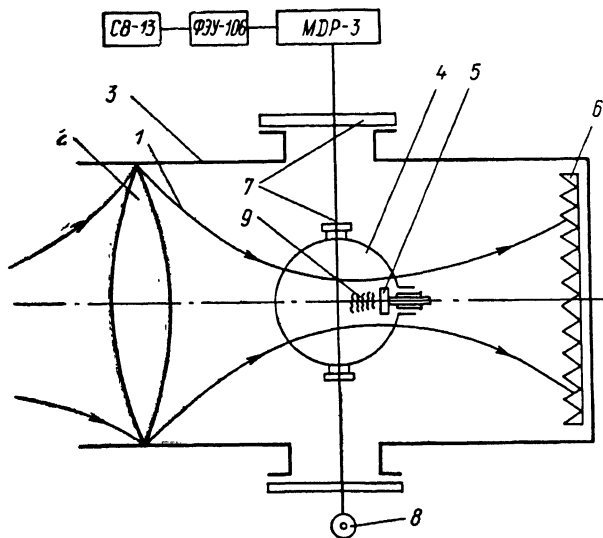


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — луч СВЧ, 2 — полистироловая линза, 3 — металлическая камера, 4 — колба, 5 — металлодиэлектрическая пластина, 6 — поглощающая СВЧ нагрузка, 7 — кварцевые окна, 8 — ртутная лампа, 9 — СВЧ разряд.

В фокальной области СВЧ пучка так, как показано на рис. 1, располагается наполненный рабочим газом радиопрозрачный сосуд сферической формы (материал — молибденовое стекло, диаметр  $\sim 14$  см). Рабочий газ — пропускаемая через осушитель смесь азот—кислород. Предусмотрена возможность снижения температуры газонаполненного сосуда до  $\sim 100$  К.

СВЧ разряд в газовой смеси высокого давления ( $70 \leq p \leq 760$  Тор) инициировался диэлектрической пластиной 5 с пониженным порогом поверхностного пробоя [6]. После облучения газосодержащего сосуда заданным числом СВЧ импульсов, возбуждающих разряд, измерялось содержание наработанных продуктов. Измерения проводились через времена, достаточно большие для установления равновесного состава  $\text{NO}_2-\text{N}_2\text{O}_4$ .

Методика определения наработки продуктов плазмохимических реакций ( $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ) основана на определении степени ослабления диагностического светового пучка, пропускаемого через сосуд с рабочим газом. Источник диагностического излучения — ртутная лампа ПРК-2. Излучение ее вводилось и выводилось из рабочего сосуда через кварцевые окна 7. На выходе располагался монохроматор МДР-3, выделяющий из спектра излучения ртутной лампы длину волны  $\lambda$ . При расчете концентрации наработанных продуктов использовались сечения поглощения зондирующего излучения  $\sigma_\lambda$  на длинах волн  $\lambda = 2536.52, 3341.48, 4046.56 \text{ \AA}$ , приведенные в [12].

## Результаты измерений

На рис. 2 приведены результаты измерения временной зависимости наработки  $\text{NO}_2$  в смеси  $\text{N}_2 : \text{O}_2 = 4 : 1$ . Разряд в объеме газонаполненного сосуда возбуждался периодическими посылками СВЧ импульсов с частотой  $f=2$  Гц в течение времени  $t_c=930$  с, после чего генератор отключался (на рисунке момент отключения отмечен звездочками). Видно, что при работе генератора содержание  $\text{NO}_2$  растет почти линейно со временем. После выключения генератора содержание  $\text{NO}_2$  продолжает увеличиваться, причем сначала с более высокой, чем во время облучения, скоростью. Затем скорость роста концентрации молекул  $\text{NO}_2$  замедляется, величина  $n_{\text{NO}_2}$  достигает насыщения ( $n_{\text{NO}_2}$ )<sub>s</sub>.

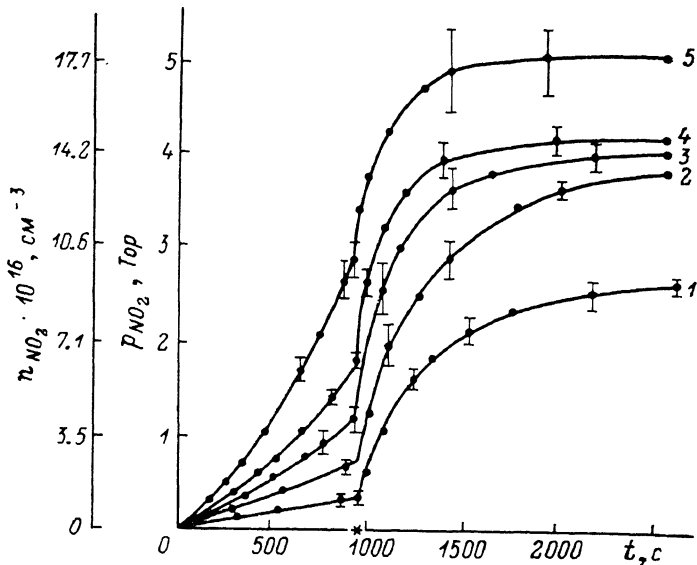


Рис. 2. Временная зависимость наработки  $\text{NO}_2$  в воздухе.

$P=200$  кВт,  $\tau_f=40$  мкс,  $f=2$  Гц,  $t_c=930$  с; 1 — 75, 2 — 112.5, 3 — 150, 4 — 185, 5 — 300 Тор.

Чем больше время облучения  $t_c$ , тем выше уровень наработки диоксида, достижимый после выключения СВЧ генератора (рис. 3). Однако, как показывают измерения, долговременное облучение (за времена  $t_c$  много больше, чем те, при которых построена зависимость на рисунке) приводит к выходу на стационар по синтезированным в разряде окислам азота. Это предельное для фиксированных разрядных условий значение концентрации молекул  $\text{NO}_2$  обозначим через  $(n_{\text{NO}_2})_{\text{max}}$ . Полученная в экспериментах величина  $(n_{\text{NO}_2})_{\text{max}}$  однозначно определяет и предельную наработку в разряде оксида азота  $(n_{\text{NO}})_{\text{max}}$ . Зависимость  $(n_{\text{NO}})_{\text{max}}$  от исходного давления рабочей смеси приведено на рис. 4, откуда следует, что значение  $(n_{\text{NO}})_{\text{max}}$  растет с ростом давления. Процентное же содержание  $\text{NO}$  характеризуется максимумом в области давления  $p \approx 200-300$  Тор.

Исследована зависимость наработки окислов азота и озона от исходной температуры газа. Содержание наработанного озона в диапазоне температур 200—300 К оставалось ниже порога обнаружения (при облучении 1000 импульсами). В условиях эксперимента применявшаяся методика позволяет определять  $n_{\text{O}_3} \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Наличие озона удалось зарегистрировать лишь при  $T_g \leq \leq 130$  К и переходе к малым давлениям ( $p=10$  Тор). При этом заметное изменение прохождения диагностического светового луча (в диапазоне полосы Хартли спектра поглощения  $\text{O}_3$ , длина волны  $\lambda=2536.52 \text{ \AA}$ ) наблюдалось уже после одного выстрела. Наравотка же окислов азота в интервале давлений 100—300 Тор практически не зависит от степени охлаждения газовой смеси.

Для определения каналов плазмохимических процессов важными являются измерения зависимости наработки продуктов окисления от относительного содержания компонентов смеси  $\text{N}_2 : \text{O}_2$ . Результаты измерений приведены на

рис. 5. Здесь представлена зависимость концентрации наработанных молекул ( $n_{NO}$ ), от относительного содержания азота в смеси  $\alpha_{N_2} = P_{N_2} / (P_{N_2} + P_{O_2})$ , где  $P_{N_2}$  и  $P_{O_2}$  — парциальные давления компонентов. В проведенном цикле измерений  $P_{N_2} + P_{O_2} = 300$  Тор. Время облучения рабочего сосуда последовательно СВЧ импульсов с частотой  $f = 2$  Гц составляет 1890 с (суммарная энер-

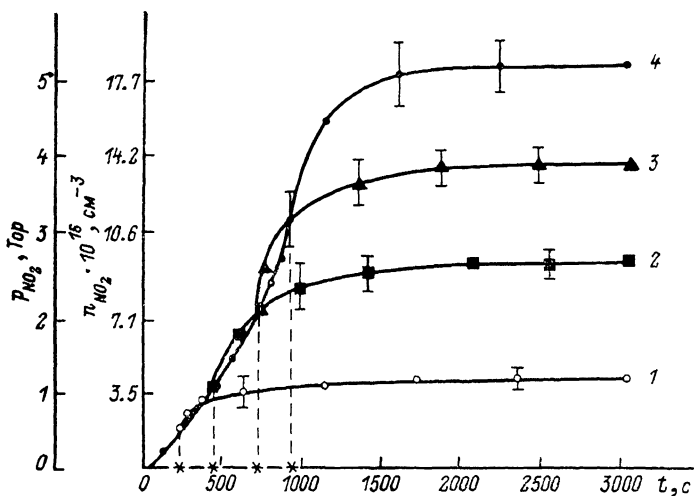


Рис. 3. Зависимость уровня стационара концентрации  $n_{NO_2}$  от времени облучения.

$P = 200$  кВт,  $\tau_f = 40$  мкс,  $f = 2$  Гц; 1 — 250, 2 — 500, 3 — 750, 4 — 930 с.

гия, вложенная в газ, 9 кДж). Видно, что зависимость характеризуется наличием максимума, соответствующего смеси с примерно равным содержанием азота и кислорода. Типичным для зависимости является и симметричный относительно максимума спад кривой в сторону меньших и больших содержаний

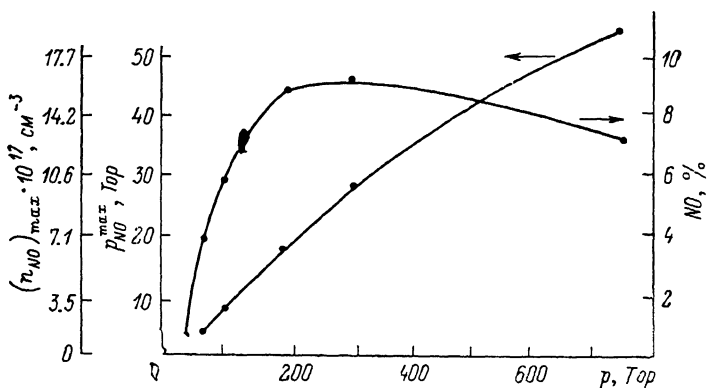


Рис. 4. Зависимость предельно достижимой концентрации NO от исходного давления в воздухе.

$P = 200$  кВт,  $\tau_f = 40$  мкс,  $f = 2$  Гц.

$N_2$ . Симметрия нарушается лишь при больших отклонениях от равностойкой смеси  $N_2$  и  $O_2$  в сторону увеличения наработки окислов при малых содержаниях азота.

Один из основных параметров, характеризующих эффективность плазмохимической реакции окисления азота, — энергетическая цена акта образования молекулы окисла. Оценка этой величины может быть проведена по простой формуле

$$\epsilon = \frac{P \cdot \tau_f \cdot f \cdot t_c \cdot 6.25 \cdot 10^{18}}{n_{NO} \cdot V} \quad (\text{эВ/мол}), \quad (1)$$

где  $n_{\text{NO}}$  — концентрация наработанного продукта,  $V$  — объем рабочего сосуда в  $\text{см}^3$ , а  $P$  — мощность в фокусе в Вт. Величина  $\epsilon$  минимальна при равном содержании компонент в азотно-кислородной смеси и составляет при этом  $\epsilon \approx 75$  эВ/мол. NO. При изменении  $\alpha_{\text{N}_2}$  в интервале 0.2—0.8 энергетическая цена реакции не превышает 120 эВ/мол. NO.

### Обсуждение результатов измерений

Теория плазмохимического процесса окисления азота построена для следующих состояний рабочей смеси [1]: термически равновесного состояния, при котором нагрев смеси  $\text{N}_2 : \text{O}_2$  сменяется быстрой закалкой с сохранением полученного на стадии нагрева продукта; неравновесной реагирующей среды с отрывом «колебательной» температуры  $T_v$  молекул азота от газокинетической температуры  $T_g$  ( $T_v/T_g \gg 1$ ), реакция синтеза NO стимулируется колебательным возбуждением  $\text{N}_2$  в основном электронном состоянии; реакции окисления в неравновесной среде с отрывом электронной температуры от газовой ( $T_e/T_g \gg 1$ ), стимулированной электронным возбуждением молекул  $\text{N}_2$ .

В сложном, пространственно неоднородном СВЧ разряде высокого давления по сложившимся в настоящее время представлениям [6] можно выделить две характерные области. Одна из них — тонкие, ярко светящиеся каналы, окру-

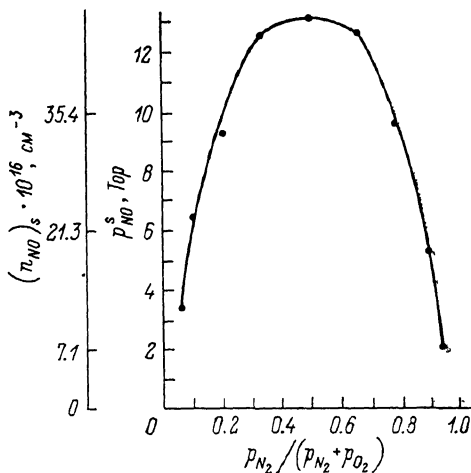


Рис. 5. Зависимость предельной концентрации наработанных молекул NO от относительного содержания азота в смеси с кислородом.  $p=300$  Тор,  $P=155$  кВт,  $f=1$  Гц,  $\tau_f=40$  мкс.

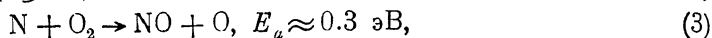
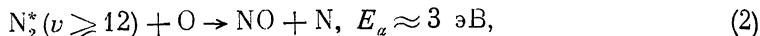
женные «темной», холодной, фотоионизованной средой (межканальные промежутки). Параметры канальной структуры определялись экспериментально [13, 14] и рассчитывались теоретически [15, 16]. Согласно экспериментам поперечный размер канала  $\leq 0.3$  мм, концентрация электронов  $n_e \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_g \leq 2000$  К и  $T_e \approx 1 - 3$  эВ. Значения параметров, полученные в расчетах [15], близки к экспериментальным.

Вне области контракции, в плазменном «ореоле», создаваемом ионизирующим излучением каналов, среда характеризуется относительно низкой температурой газа  $T_g$  при достаточно высоких электронной и «колебательной» температурах  $T_e \ll T_v$ ,  $T_v$  ( $T_g \leq 600$  К,  $T_e \leq 3000$  К,  $T_v \approx 0.7$  эВ).

Процессы окисления, в основе которых лежит нагрев газа с последующей закалкой, могли бы иметь место в канальных структурах. Однако в соответствии с [1] для получения столь высокой, как в эксперименте, наработки продуктов окисления необходимо поднять температуру газа до величин, заметно превосходящих измеренное значение. Так, согласно расчетам при  $p=760$  Тор в воздухе максимальное содержание NO достигается при  $T_g \approx 3500$  К и составляет  $\sim 5\%$ . При давлении  $p=100$  Тор максимум содержания приходится на 3200 К и равен 3%. Как следует из рис. 4, измеренные величины процентного содержания NO оказываются выше расчетных максимальных значений. Существенно при этом, что это отличие должно быть много большим, так как измеренные величины температуры газа в каналах не превышают 2000 К [6]. Таким образом, необходимо либо исключить нагрев газа с последующей закалкой, либо сделать вывод о некорректности измерения газовой температуры. Поскольку не видно источника значительных ошибок в определении величины  $T_g$ , то предположение о неприемлимости термодинамической модели представляется наиболее вероят-

ным. Справедливость сделанного утверждения подтверждается и тем, что помимо высокой температуры необходима и чрезвычайно высокая скорость закалики ( $\geq 10^7$  K/c) горячего канала (закалка, обеспечивающая сохранность продуктов реакции). Возможность столь быстрого снижения  $T_g$  в разрядных условиях проблематична.

Окисление  $N_2$  через возбуждение электронным ударом колебаний основного электронного состояния молекул происходит по схеме



$E_a$  — энергия активации реакций,  $v$  — номер колебательного уровня молекулы  $N_2$ .

Реакции (2) предшествуют возбуждению нижних колебательных уровней  $N_2$  электронным ударом (коэффициент скорости  $k_{v,2} \approx 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/с при  $T_e \sim 1$  эВ) и заселение высоких колебательных состояний в результате  $V-V$ -процессов.

Энергетическая эффективность плазмохимических процессов синтеза оксидов азота, стимулированных колебательным возбуждением молекул  $N_2$ , существенным образом зависит от удельного энерговклада в газовую среду [1]. Так, при  $w=1$  эВ/мол. эффективность максимальна и достигает 35 %, при  $w < 0.2$  эВ/мол. эффективность реакции ничтожно мала («пороговый» энерговклад). В условиях нашего эксперимента величина удельного энерговклада

$$w \approx \frac{S_0}{u_0 \cdot n_m}, \quad (4)$$

где  $S_0$  — интенсивность излучения,  $u_0$  — средняя аксиальная скорость распространения разряда.

При 300 Тор и мощности 200 кВт ( $S_0 \approx 30$  кВт/см<sup>2</sup>) скорость около  $1.6 \times 10^5$  см/с, т. е.  $w \approx 0.1$  эВ/мол. Столь малая величина удельного энерговклада ставит под сомнение предположение об определяющей роли колебательного возбуждения основного электронного состояния молекулы азота, которое имеет место в областях между разрядными нитями (каналами). В результате мы приходим к необходимости рассмотреть собственно разрядные каналы и близко прилегающие к ним области разряда.

Высокая концентрация и температура электронов в каналах при относительно большом времени жизни последних ( $\geq 1$  мкс) позволяют предположить, что в центральных частях областей контракции молекулы воздуха полностью диссоциированы. В силу этого основными реакциями образования и уничтожения оксида азота можно принять реакции

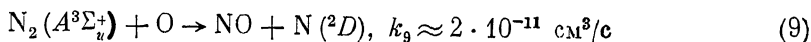


константы которых соответственно равны  $k_5 = 4.4 \cdot 10^{-33}$  см<sup>6</sup>/с,  $k_6 \approx 6 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с,  $k_7 \approx 4.2 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с [17]. Здесь при оценке постоянных принято, что  $T_g = 1600$  К. Из кинетики реакций видно, что концентрация оксида не превышает значения

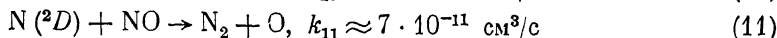
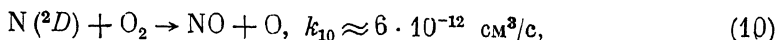
$$n_{NO} \leq (k_5 \cdot n_m \cdot n_O + k_6 \cdot n_{O_2}) / k_7 \quad (8)$$

и не зависит от концентрации атомарного азота (в силу быстрого аксиального движения разряда мы принимаем, что образование радикалов происходит в активной фазе разряда, а химические реакции протекают в послеразрядное время). Максимальная концентрация оксида может быть оценена подстановкой в (8) начальных концентраций атомов и молекул кислорода. Отсюда при 300 тор  $n_{NO} \leq 0.2 \cdot n_{O_2}$ , что почти на два порядка ниже измеренной максимальной концентрации оксида в воздухе при 300 Тор (рис. 4). Очевидно, что концентрация оксида в нитях не может быть меньше максимально достижимого среднего значения концентрации по объему (для каналов это справедливо в силу того, что

все молекулы диссоциируют в них при каждом новом разряде). Ситуация несколько улучшается, если принять, что основная масса атомов находится в возбужденном электронном состоянии  $N(^2D)$ . Однако поскольку возрастают постоянные реакций (6) и (7), то расхождение с экспериментом остается почти на порядок величины. Таким образом, наиболее горячие области разряда вряд ли могут быть ответственны за образование оксида. Остается предположить, что в образовании окислов основную роль играют области, прилегающие к каналам, где из-за нагрева газа его плотность понижена, следовательно, величина  $E/n_m$  достаточна для того, чтобы электронное возбуждение молекул азота стало бы значительным для образования оксида в реакции



с последующими реакциями образования и потерь



с начальными условиями  $n_{N_2(A)}^0 \equiv n_{N_2(A^3\Sigma_u^+)}^0 \approx k_{eN_2} \cdot n_{N_2} \cdot n_e \cdot \tau$ ,  $n_O^0 \approx 2 \cdot k_{eO_2} \cdot n_{O_2} \cdot \tau$ , где  $\tau$  — время экранировки поля,  $n_e$  — концентрация электронов, а  $k_{eN_2}$  и  $k_{eO_2}$  — константы возбуждения азота и диссоциации кислорода электронным ударом.

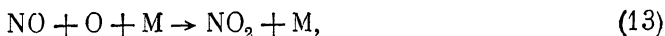
Качественный анализ кинетики реакций (9)—(11) показывает, что имеются два режима образования оксида в зависимости от начальных условий. Если  $n_{N_2(A)}^0 < k_{10} \cdot n_{O_2} / k_{11}$ , то образование оксида в реакции (10) превышает его потери в реакции (11) и концентрация оксида плавно достигает своего конечного значения порядка  $n_{N_2(A)}^0$ . В случае обратного неравенства концентрация оксида достигает максимального значения порядка  $n_{N_2(A)}^0$ , а затем падает до конечного значения порядка

$$(n_{NO})_{\max} \approx (2 \cdot k_{10} \cdot n_{O_2} \cdot n_{N_2(A)} / k_{11})^{1/2}. \quad (12)$$

Как показывают оценки, для наших условий реализуется именно этот случай. Если теперь положить плотность газа в прилегающих к каналам областях  $\sim 0.5$  от плотности невозмущенного воздуха, то для давления 300 Тор и мощности 200 кВт  $E/n_m \approx 1.5 \cdot 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>, а значение  $(n_{NO})_{\max} / n_m \approx 1.6 \cdot 10^{-20} \cdot n_m \approx 0.1$ , что близко к экспериментальным значениям.

Из выражения (12) нетрудно также видеть, что максимум концентрации оксида достигается при равенстве концентраций азота и кислорода. Таким образом, находит объяснение зависимость выхода оксида от относительной концентрации азота (рис. 5). Однако пока затруднительно дать толкование зависимости процентного выхода оксида от давления газовой смеси (рис. 4). Возможно, что эта зависимость связана с уменьшением удельного энерговклада в разряд с ростом плотности газа из-за постоянства скорости распространения разряда в диапазоне давлений 150—760 Тор.<sup>1</sup>

Обратимся теперь к временной зависимости наработки  $NO_2$  (рис. 2). Исходная предпосылка в анализе заключается в том, что непосредственно в разряде образуются молекулы  $NO$  в результате указанных выше реакций. Доокисление же  $NO$  до  $NO_2$  может происходить в результате взаимодействия оксида с атомарным, молекулярным кислородом или с озоном



Вместе с тем на активной стадии облучения (в разряде), по-видимому, существуют и механизмы обратной конверсии  $NO_2$  в  $NO$

<sup>1</sup> В недавно опубликованной работе [18] при расчетах возможной наработки окислов азота в СВЧ разрядах в стратосфере не учтены столь важные каналы, как (2), (3) и (9), (10), (11), что, безусловно, делает некорректным проведенный в [18] анализ, тем более, что эти реакции наиболее существенны для производства оксидов азота при параметре  $E/n_m$  порядка пробных и энерговкладах  $\sim 0.1-1$  Дж/см<sup>3</sup>·атм.



«Выключение» реакций (16)—(18) в послеразрядный период приводит к увеличению содержания  $\text{NO}_2$ . Причем на этих стадиях, по-видимому, играют роль лишь процессы (14) и (15). Выбор между этими двумя реакциями может быть сделан на основании закона роста концентрации  $\text{NO}_2$  после выключения СВЧ накачки. Кривые доокисления, перестраиваемые в зависимости  $1/n_{\text{NO}}(t)$ , представляют собой прямую линию, что является аргументом в пользу определяющей роли трехчастичной реакции (14).<sup>2</sup>

### Выводы

Основные результаты проведенных измерений заключаются в следующем.

1. В сложном, пространственно неоднородном разряде, возбуждаемом пучком микроволн в азотно-кислородной смеси высокого давления, в условиях, близких к условиям свободного пространства, происходит наработка окислов азота с энергетической ценой акта окисления 75—200 эВ/мол. оксида.

2. Основной механизм реакции окисления, по-видимому, связан с возбуждением электронным ударом метастабильных электронных уровней молекул азота. При этом основным местом наработки оксида являются прилегающие к разрядным «каналам» области с пониженной плотностью газа.

3. Максимум эффективности наработки окислов приходится на смесь, равносодержащую азот и кислород.

### Список литературы

- [1] Русанов В. Д., Фридман А. А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 394 с.
- [2] Быков Ю. В., Голубев С. В., Гольденберг Л. Л., Зорин В. Г. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 723—726.
- [3] Быков Ю. В. // ХВЭ. 1984. Т. 18. № 4. С. 347—353.
- [4] Грицинин С. И., Колик Л. В., Косый И. А. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 12. С. 2293—2300.
- [5] Анзин В. Б., Голант К. М., Грицинин С. И. и др. Аннотации докл. Всесоюз. совещания «ВЧ разряд в волновых полях». Горький, 1987. С. 67.
- [6] Батанов Г. М., Грицинин С. И., Косый И. А. и др. // Тр. ФИАН. 1985. Т. 160. С. 174—203.
- [7] Голубев С. В., Грицинин С. И., Зорин В. Г. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 136—197.
- [8] Косый И. А. // Вестн. Киевского университета. Физика. Кив: Высшая школа, 1988. № 29. С. 88—92.
- [9] Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизованная область в атмосфере. М., 1986. 184 с.
- [10] Askarjan G. A., Batanov G. A., Gritsinin S. I. et al. // IX ESCAMPIG. Lisbon, 1988. Vol. 12H. P. 59—61.
- [11] Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Косый И. А., Костинский А. Д. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 3. С. 566—569.
- [12] Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 500 с.
- [13] Грицинин С. И., Дорофеев А. А., Косый И. А., Магунов А. Н. // ТВТ. 1987. Т. 25. № 6. С. 1068—1071.
- [14] Gritsinin S. I., Kosy I. A., Silakov V. P., Tarasova N. M. // XVIII ICPIG. Swansea, 1987. P. 232—240.
- [15] Ким А. В., Фрайман Г. М. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 3. С. 613—617.
- [16] Коган Е. Я., Кузин В. Ю. // ПМТФ. 1988. № 3. С. 28—34.
- [17] Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1987. Вып. 14. С. 3—31.
- [18] Ларин В. Ф., Румянцев С. А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 6. С. 87—90.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
6 июля 1989 г.

<sup>2</sup> Отметим, что в работе [2], посвященной синтезу окислов азота в разряде, возбуждаемом пучком мощного СВЧ излучения, была исследована лишь область высоких значений параметра  $E/n_m$  (большее, чем пороговые, для самоподдерживающегося разряда значения). Самоподдерживающийся разряд в этих условиях характеризовался формированием «волны пробоя» с существенно большей, чем в настоящем эксперименте, скоростью переноса области ионизации навстречу СВЧ излучению. Приводя полученные в эксперименте значения энергетической цены реакции, авторы работы [2] не определили и не обсудили возможные каналы протекания химических процессов.