

03;10;12

## Конверсия оксидов серы и азота в воздухе под действием микросекундных пучков электронов

© Г.В. Денисов, Д.Л. Кузнецов, Ю.Н. Новоселов, Р.М. Ткаченко

Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: nov@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 19 июля 2001 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований конверсии оксидов серы и азота в ионизированной газовой смеси, моделирующей состав отходящих газов тепловых электростанций. В качестве источника ионизации использовался импульсный пучок электронов микросекундной длительности. Показано взаимное влияние обоих сортов оксидов на процесс их конверсии. Рассмотрены возможные кинетические механизмы удаления оксидов серы и азота из газовой смеси.

### Введение

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды являются дымовые газы тепловых электростанций, выносящие в атмосферу оксиды серы и азота в больших количествах. Эти соединения, взаимодействуя с парами воды и накапливаясь в атмосфере, являются причиной образования кислотных дождей. Для снижения вредного воздействия на окружающую среду диоксида серы  $\text{SO}_2$  и оксидов азота  $\text{NO}_x$  необходима очистка дымовых газов непосредственно в месте их попадания в атмосферу, т.е. на тепловых электростанциях. Существует несколько подходов к решению этой проблемы, одним из которых является обработка дымовых газов электронными пучками.

Для этой цели обычно используются ускорители электронов непрерывного действия, генерирующие пучки с невысокой плотностью тока  $\sim 10^{-5} - 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  (см., например, обзор [1] и сборник [2]). Удаление токсичных примесей в этом случае происходит в несколько этапов [3]. Вначале при воздействии быстрых электронов пучка на дымовые газы, содержащие кроме удаляемых оксидов пары воды, происходит генерация свободных радикалов  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}_2\text{H}$  и др. Затем в результате протекания химических реакций с участием таких радикалов происходит окисление  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  до соответствующих кислот —  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{HNO}_3$ . На следующем этапе кислоты взаимодействуют со специально добавляемым в дымовой газ аммиаком и образуют сульфаты и нитраты аммония в виде твердого порошка. На заключительном этапе очистки происходит улавливание этих порошков различного рода фильтрами.

Теория первых двух этапов развита до уровня хорошего совпадения с экспериментальными результатами [4,5]. Дальнейшее развитие теоретических представлений о свободно-радикальном механизме окисления примесей при электронно-лучевой очистке дымовых газов связано с исследованием гетерофазных процессов и образования аэрозолей [6,7].

Использование электронных пучков позволяет добиться высокой степени очистки — до 95% для  $\text{SO}_2$  и до 80%

для  $\text{NO}_x$  [1–3]. При этом затраты энергии на удаление одной молекулы составляют от 12 до 30 и более электрон-вольт на одну молекулу ( $\text{eV/mol}$ ). Эти значения приводят к необходимости потребления мощности на очистку газа, которая составляет до 3–5% установленной мощности тепловых электростанций. Снижение затрат энергии является основной задачей при создании электронно-лучевой технологии очистки.

Ранее на примере диоксида серы было показано [8,9], что применение импульсных пучков электронов позволяет значительно, в несколько раз, снизить затраты энергии на удаление одной токсичной молекулы. Это стало возможно, потому что использование таких пучков с оптимальными параметрами позволяет реализовать цепной плазмохимический механизм конверсии  $\text{SO}_2$ . Снижение затрат энергии и при удалении оксидов азота  $\text{NO}_x$  импульсными пучками зарегистрировано в [10,11]. Однако в этих работах исследовалось удаление либо только диоксида серы  $\text{SO}_2$ , либо только оксидов азота  $\text{NO}_x$ . В настоящей работе с использованием импульсных электронных пучков экспериментально исследовано взаимное влияние оксидов  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  на их конверсию.

### Техника и методика эксперимента

Эксперименты выполнялись на установке, созданной на основе импульсного ускорителя электронов с плазменным катодом, конструкция которого аналогична описанной в [12]. Электронный пучок, формируемый ускорителем, имел сечение  $10 \times 100 \text{ cm}^2$ , энергию 200 keV, длительность импульса на полувысоте  $\tau \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  и плотность тока пучка  $j$  от 4.5 до  $12.5 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ . Через титановую фольгу толщиной  $20 \mu\text{m}$  пучок инжектировался в газовую камеру объемом 12 л. Энергия пучка, поглощенная в газе, определялась как  $W = j\tau D$ , где  $D$  — доза поглощенной газом энергии на единицу длины. Произведение  $j\tau$  определялось интегрированием осциллограмм тока и напряжения, величина  $D$  измерялась с помощью пленочных детекторов типа ЦДП-Ф-2 по стандартной методике [13].

Модельная газовая смесь готовилась в специальном смесителе, затем она напускалась в предварительно вакуумированную и дважды промытую чистым азотом плазмохимическую камеру. В камере исследуемая смесь принудительно прокачивалась по замкнутому контуру в течение всего времени эксперимента. Попыты по конверсии оксидов азота и серы проводились в модельной смеси, содержащей азота около 90%, кислорода — 10% и примесных оксидов  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  с концентрацией от 0 до 5000 ppm.

Контроль качественного и количественного состава газовой смеси проводился хроматографическим и электрохимическим методами с использованием газового хроматографа „Цвет 500М“ и анализатора дымовых газов „Testo-350“. Хроматограф применялся для измерения концентраций кислорода и азота, прибором „Testo-350“ измерялись концентрации примесей  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ . Для определения концентраций  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , сумма которых составляет величину примеси  $\text{NO}_x$ , использовался кондуктометрический метод с криогенным отделением  $\text{NO}$  от  $\text{NO}_2$  [14]. В первом случае при криогенном отделении  $\text{NO}$  от  $\text{NO}_2$  определялась концентрация монооксида азота  $[\text{NO}]$ , а во втором — без разделения, общая концентрация оксидов азота  $[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2]$ . Содержание оксидов азота находилось из калибровочного графика зависимости концентрации  $[\text{NO}]$  от проводимости поглотительного раствора, которая была определена в отдельном эксперименте на стандартных газовых смесях  $\text{NO} + \text{N}_2$  для интервала концентраций  $\text{NO}$  от 200 до 5500 ppm. Среднестатистическая погрешность измерений не превышала 0.03. Используемая методика не позволяла в ходе эксперимента осуществлять одновременный контроль концентраций обоих сортов примеси — оксидов серы и азота. Поэтому в опытах контролировался начальный состав смеси, а в процессе эксперимента — концентрация только одного сорта примеси: либо диоксида серы, либо оксидов азота.

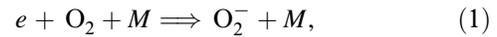
Облучение исследуемой газовой смеси осуществлялось в одиночном режиме следования импульсов. В каждом опыте производилось 300–500 импульсов, при этом содержание оксидов азота и серы контролировалось через каждые 50 импульсов. При проведении экспериментов определялись как абсолютное изменение концентрации оксидов серы или азота, так и степень конверсии, а также затраты энергии на удаление одной молекулы примеси. Степень конверсии  $\eta$  и затраты энергии  $\varepsilon$  вычислялись отдельно для каждого сорта оксидов как

$$\eta = \Delta[C]/[C]_0, \quad \varepsilon = WN/e\Delta[C] \text{ (eV/mol)}.$$

Здесь  $\Delta[C]$  — изменение концентрации оксидов  $\text{SO}_2$  или  $\text{NO}_x$  за серию импульсов облучения ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $[C]_0$  — начальная концентрация примеси в исследуемой смеси ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $W$  — поглощенная в газе энергия пучка за один импульс ( $\text{J/cm}^3$ ),  $N$  — количество импульсов в серии облучения,  $e$  — заряд электрона (Coul). Общая погрешность измерений величины  $\varepsilon$  с учетом погрешности определения поглощенной энергии  $W$  не превышала 0.3.

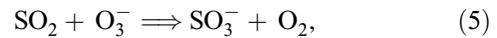
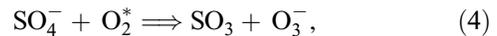
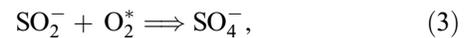
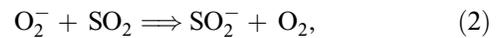
## Конверсия диоксидов серы

Ранее [9] было показано, что в дымовых газах, содержащих в качестве примеси только диоксид серы, при облучении пучками электронов микросекундной длительности реализуется цепной механизм конверсии  $\text{SO}_2$ . Иницирование цепи осуществляется реакцией трехчастичного прилипания термализованных электронов пучка и деградационного каскада к молекулам кислорода с образованием отрицательных ионов  $\text{O}_2^-$

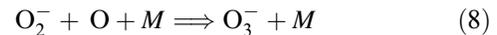


где  $M$  — третья частица, которой могут быть молекулы азота, кислорода или воды.

Гибель активных ионов  $\text{O}_2^-$  происходит в реакциях продолжения цепи и в конкурирующих с ними реакциях рекомбинации с положительными ионами азота  $\text{N}_2^+$ . Реакциями цепного окисления являются следующие [15]:

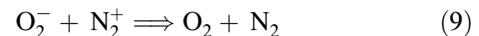


Освободившийся в реакции (6) электрон может участвовать в реакции (1), замкнув тем самым цепь реакций. Кроме того, в механизме (1)–(6) активно участвуют отрицательные ионы озона, которые могут образовываться в реакциях



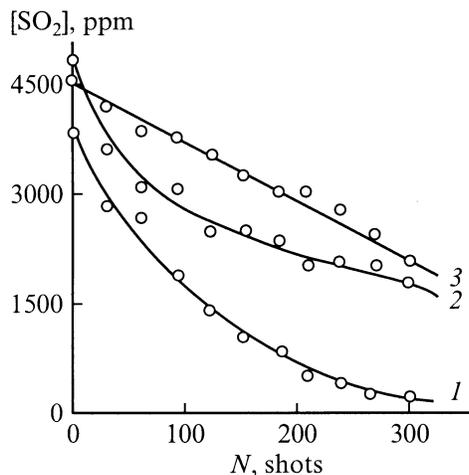
и других с участием атомарного кислорода и ионов  $\text{O}_2^-$  [16].

Характерное время конкурирующей с (2) и (8) реакции рекомбинации с участием ионов азота и кислорода



составляет при атмосферном давлении, невысокой влажности и параметрах пучка, используемого в наших опытах,  $\sim 10\text{--}20 \mu\text{s}$  [17]. Поэтому при больших временах убыль ионов  $\text{O}_2^-$  в реакции (9) резко возрастает, что приводит к непродуктивным потерям  $\text{O}_2^-$  и снижает вероятность возникновения цепного механизма. Таким образом, применение импульсного электронного пучка с оптимальной плотностью тока  $j \sim 10^{-3} \text{ A/cm}^2$  и длительностью импульса  $\tau \sim 10 \mu\text{s}$  позволяет реализовать цепной механизм окисления  $\text{SO}_2$  с малыми  $\sim 1 \text{ eV/mol}$  затратами энергии [9].

Полученные в наших опытах зависимости изменения концентрации диоксида серы от количества импульсов  $N$  облучения смеси при различной начальной концентрации  $\text{NO}_2$  показаны на рис. 1. Состав модельной смеси был следующим:  $\text{N}_2 \sim 88.5\%$ ,  $\text{O}_2 \sim 10\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} \sim 1\%$ ,



**Рис. 1.** Зависимость изменения концентрации диоксида серы  $\text{SO}_2$  от количества импульсов облучения  $N$ . Концентрация примеси  $\text{NO}_2$ , ppm: 1 — 0, 2 — 1000, 3 — 500.

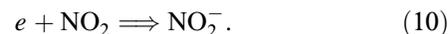
$\text{NO} \sim (0 \div 0.1)\%$ . Начальная концентрация  $\text{SO}_2$  соответствует величине на оси ординат при  $N = 0$ . Видно, что снижение концентрации  $\text{SO}_2$  зависит от содержания в исследуемой смеси оксида азота и происходит наиболее интенсивно при отсутствии примеси  $\text{NO}_2$  (кривая 1). В этом случае реализована степень конверсии  $\eta \sim 98\%$ , а затраты энергии  $\varepsilon$  составили при этом  $\sim 4 \text{ eV/mol}$ . Вероятно, в этом режиме реализуется цепной механизм окисления  $\text{SO}_2$ . Затраты энергии несколько выше, чем в [9], в связи с тем, что используемый в описываемых опытах электронный пучок не обладал оптимальными параметрами.

Добавление в газовую смесь небольших количеств оксидов азота  $[\text{NO}_2] \sim 500 \text{ ppm}$  ухудшали эффективность удаления  $\text{SO}_2$  (рис. 1 кривая 3): степень конверсии  $\eta$  снижалась при этом до 60%. Дальнейшее увеличение концентрации оксидов азота  $[\text{NO}_2] \sim 1000 \text{ ppm}$  приводило к некоторому улучшению процесса — степень конверсии повышалась до  $\sim 65\%$ .

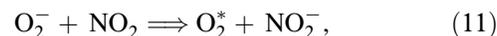
Энергетической характеристикой процесса удаления диоксида серы являются затраты энергии  $\varepsilon$  на удаление одной молекулы  $\text{SO}_2$ . На рис. 2 приведены зависимости величины  $\varepsilon$  (1), а также зависимость степени конверсии  $\eta$  (2) от начальной концентрации  $\text{NO}_2$  в исследуемой смеси. Количество импульсов облучения было равно 300 для каждой точки. Видно, что увеличение начальной концентрации  $\text{NO}_2$  вызывает снижение степени конверсии диоксида серы и увеличение затрат энергии на удаление одной молекулы  $\text{SO}_2$ . При дальнейшем увеличении концентрации  $\text{NO}_2$  затраты энергии несколько снижались.

Рассмотрим вероятные причины, которые могут вызывать такое поведение характеристик процесса конверсии  $\text{SO}_2$  при добавках оксидов азота. Присутствие в газовой смеси, содержащей диоксид серы, молекул  $\text{NO}_2$  может вызвать инициирование конкурирующих процессов, приводящих к снижению концентрации как отрицательных ионов кислорода  $\text{O}_2^-$  и озона  $\text{O}_3^-$ , так и

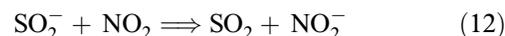
ионов  $\text{SO}_2^-$ , т. е. ионов, участвующих в цепном механизме. Одним из таких процессов может быть прилипание термализованных электронов пучка к электроотрицательной молекуле  $\text{NO}_2$ , обладающей энергией сродства к электрону, равной 2.42 eV,



Другим процессом является конкурирующая с (2) реакция перезарядки

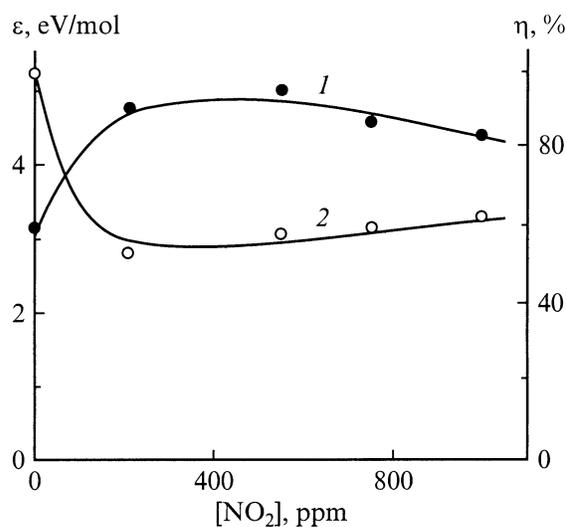


константа скорости которой заметно выше, чем реакции (2). Для реакции (2) ее значение составляет  $k_2 \sim 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ , а для реакции (11)  $k_{11} \sim 12 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$  [18]. Потеря отрицательных ионов  $\text{SO}_2^-$  в реакции перезарядки



может существенно снизить вероятность возникновения цепного механизма. Эта реакция протекает достаточно интенсивно в смесях с высоким содержанием примесных оксидов, ее константа скорости равна  $k_{12} \sim 4.3 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$  [18].

Оценки влияния примеси оксидов азота были проведены для смеси, содержащей  $[\text{SO}_2] = 700 \text{ ppm}$ , и при изменении  $[\text{NO}_2]$  до 500 ppm, для электронного пучка с плотностью тока  $5 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$  и длительностью прямоугольного импульса  $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ , при этом учитывались реакции (2), (10)–(12). Упрощенный анализ показывает, что концентрация свободных электронов в ионизированной смеси устанавливается на квазистационарном уровне за характерное время  $\sim 10^{-7} \text{ s}$  и составляет  $\sim 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$ . Она практически не изменяется с добавлением примеси оксидов азота. Для условий наших экспериментов оценки показывают, что образование отрицательных ионов в



**Рис. 2.** Затраты энергии (1) и степени конверсии (2) при удалении диоксида серы в зависимости от начальной концентрации  $\text{NO}_2$ . Начальная концентрация  $\text{SO}_2$  3600 ppm.

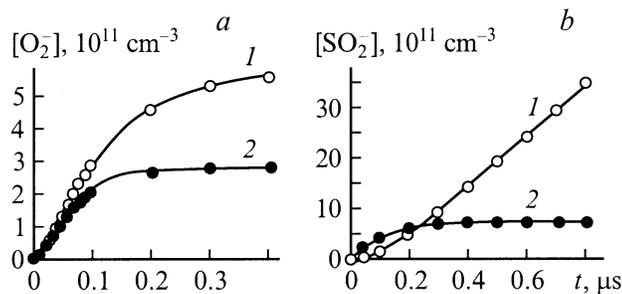


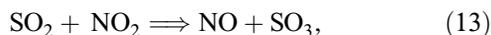
Рис. 3. Результаты упрощенного расчета: зависимости концентрации ионов  $O_2^-$  (а) и  $SO_2^-$  (б) от времени в отсутствии (1) и при наличии (2) примеси  $NO_2$ .

реакции (1) происходит более чем в 40 раз интенсивнее, чем в реакции (10). Таким образом, убыль электронов за счет прилипания в реакции (10) не может существенным образом влиять на инициирование цепного механизма окисления  $SO_2$ .

На рис. 3,а приведены расчетные зависимости концентрации отрицательных ионов кислорода от времени. Видно, что наличие оксидов азота снижает концентрацию  $O_2^-$  незначительно, т.е. конкуренция реакций перезарядки (2) и (11) не сказывается существенным образом на снижении эффективности цепного механизма (2)–(6).

Наиболее существенное влияние на снижение эффективности удаления  $SO_2$  при наличии в смеси оксидов азота оказывает реакция перезарядки отрицательных ионов  $SO_2^-$  (12). Упрощенные расчеты, выполненные для условий экспериментов, показывают, что добавление в газовую смесь 500 ppm оксидов азота  $NO_2$  приводит к значительному снижению концентрации отрицательных ионов  $SO_2^-$  (рис. 3,б). Соответственно снижается вероятность осуществления цепного механизма окисления  $SO_2$ , что вызывает уменьшение степени конверсии и повышение затрат энергии на удаление одной молекулы диоксидов серы (рис. 2).

Однако наличие в смеси достаточно большого количества оксидов азота интенсифицирует механизм химической конверсии  $SO_2$ . Это возможно при протекании реакций окисления диоксида серы под действием  $NO_2$  [19,20] с последующим образованием серной кислоты в реакции с молекулой воды

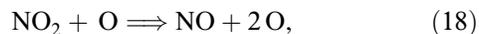
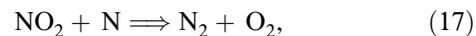
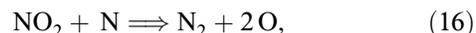


Количественные оценки для условий нашего эксперимента (например, для кривой 2 на рис. 1 при количестве импульсов облучения  $N = 300$ ) показывают, что при использовании константы скорости реакции (13)  $k_{13} = 4.1 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{s}$  [20] количество конвертировавшихся по (13), (14) молекул  $SO_2$  составляет  $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . В эксперименте (кривая 2 на рис. 1) наблюдается  $\Delta[SO_2] \sim 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Качественное совпадение этих

величин свидетельствует о том, что механизм реакций (13), (14) действительно может приводить к увеличению степени очистки и снижению затрат энергии.

## Конверсия оксидов азота

Механизм удаления оксидов азота при воздействии электронного пучка на газ связан в основном с протеканием реакций газофазного окисления  $NO_x$  по свободно-радикальному механизму [1,2]. Как уже упоминалось во Введении, под воздействием быстрых электронов пучка в газе образуются свободные атомы и радикалы, которые затем взаимодействуют с молекулами  $NO_2$ ,



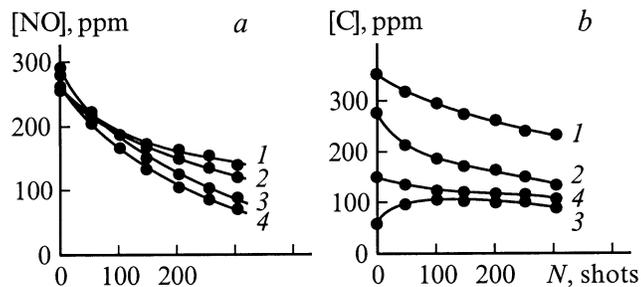
Примесь монооксида азота достаточно быстро окисляется до диоксида в реакции



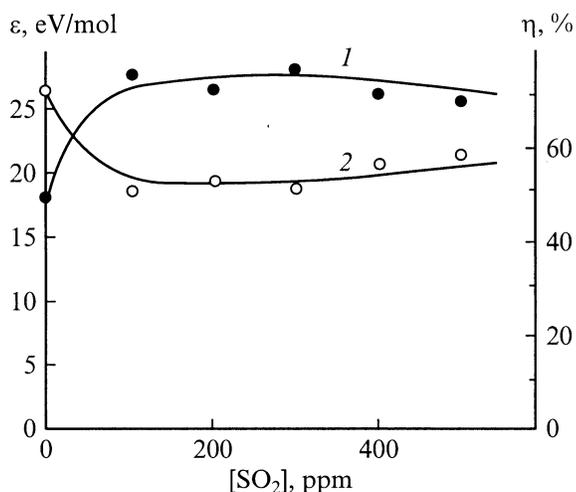
В [21] было показано, что в дымовом газе с малым содержанием кислорода конверсия  $NO_2$  эффективно может протекать без образования кислоты как конечного продукта, а именно при взаимодействии атомарного азота с оксидами  $NO_x$  в реакциях (15)–(17) с образованием атомарных и молекулярных азота и кислорода (16), (17), (19).

Снижение концентрации  $NO_x$  при воздействии на смесь  $N_2:O_2:H_2O \sim 89:10:1$  импульсного пучка показано на рис. 4. Начальная концентрация  $NO_x$  составляла в этих опытах величину 260–295 ppm. Видно, что с увеличением количества импульсов облучения концентрация оксидов азота снижается, наибольшее снижение концентрации  $NO_x$  наблюдается в отсутствие примеси диоксидов серы (кривая 4). Добавки небольшого количества  $SO_2 \sim 100\text{--}200 \text{ ppm}$  приводят к заметному замедлению процесса удаления оксидов азота. На рис. 4,б представлены зависимости изменения концентраций оксидов азота  $NO_x$ ,  $NO$  и  $NO_2$ , а также диоксида серы от количества импульсов облучения в смеси, содержащей 150 ppm  $SO_2$ . Поведение зависимостей концентрации  $NO$  и  $NO_2$ , а также  $NO_x = NO + NO_2$  аналогично подобным зависимостям в отсутствие примесей  $SO_2$  [10]. Концентрация диоксида серы  $SO_2$  плавно снижается, что также качественно соответствует ранее полученным результатам [9].

На рис. 5 приведены зависимости величины  $\varepsilon$  (1) и степени конверсии  $\eta$  (2) от начальной концентрации  $SO_2$  в исследуемой смеси. Количество импульсов облучения



**Рис. 4.** Зависимости концентрации примесей от количества импульсов облучения. *a* — монооксид азота NO при содержании  $[SO_2]$ , ppm: 1 — 100, 2 — 300, 3 — 500, 4 — 0; *b* — оксиды азота  $NO_x$  (1), NO (2),  $NO_2$  (3) и оксиды серы  $SO_2$  (4).



**Рис. 5.** Затраты энергии (1) и степени очистки (2) при удалении оксидов азота  $NO_x$  в зависимости от начальной концентрации  $SO_2$ . Начальная концентрация  $NO_x$  280 ppm.

было равно 300 для каждой точки. Видно, что наличие примеси  $SO_2$  вызывает увеличение затрат энергии на удаление одной молекулы  $NO_2$ . Снижение степени конверсии  $\eta$  наблюдается при увеличении содержания  $SO_2$  до  $\sim 100$ –300 ppm, при дальнейшем увеличении концентрации примеси параметр  $\eta$  изменяется слабо. Эти опыты проводились в смеси содержащей малое количество паров воды, недостаточное для образования аэрозолей и протекания реакций гетерофазного окисления  $NO_x$  [6,7]. При образовании в смеси аэрозолей, как отмечается в [22], за счет реакций в жидкой фазе добавление диоксида серы приводит к росту степени конверсии  $NO_x$  с одновременным удалением  $SO_2$ .

Маловероятно, что в наших опытах причиной ухудшения характеристик конверсии примеси  $NO_2$  при наличии диоксида серы являются процессы прилипания термализованных электронов к молекуле  $SO_2$ . Оценки, выполненные для этого случая, аналогично полученным ранее показывают лишь небольшое изменение концентрации электронов. Более того, энергия термализованных электронов, эффективно участвующих в реакциях

прилипания (10), (22), недостаточна для диссоциации молекул исследуемой газовой смеси и наработки заметного количества свободных радикалов. Таким образом, убыль электронов в реакциях (10), (22) незначительна для процесса конверсии  $NO_2$ .

Рассмотренные ранее ионно-молекулярные реакции с участием ионов примесных оксидов также не могут влиять на процесс удаления  $NO_2$ , поскольку механизм конверсии оксидов азота по реакциям (15)–(21) не связан с заряженными частицами. Упрощенный анализ, выполненный нами на основе приближенного решения основных кинетических уравнений, не позволяет установить кинетический механизм, ответственный за изменения степени конверсии, наблюдаемые в наших экспериментах. Для выяснения этого механизма необходимы дополнительные целенаправленные эксперименты, в которых можно проследить изменение концентраций активных частиц как во время действия импульса облучения, так и после его окончания в широком временном диапазоне.

## Заключение

Проведены исследования конверсии оксидов серы и азота в модельной газовой смеси, облучаемой импульсными электронными пучками. Полученные в работе экспериментальные результаты показывают, что наличие в дымовом газе обоих видов оксидов снижает эффективность их конверсии по сравнению со случаем, когда в газе присутствует только один из них.

В отсутствие оксидов азота  $NO_x$  в ионизированной импульсным электронным пучком смеси реализуется цепной механизм удаления диоксидов серы  $SO_2$ , связанный с образованием отрицательных ионов диоксида. Наличие в газовой смеси оксидов азота приводит к развитию конкурирующей реакции перезарядки, которая уменьшает вероятность участия отрицательных ионов  $SO_2^-$  в цепном процессе. При этом степень очистки смеси от  $SO_2$  снижается. При дальнейшем увеличении содержания  $NO_x$  в смеси выше 1000 ppm цепной механизм конверсии диоксидов серы перестает работать и их удаление происходит в реакциях окисления  $SO_2$  свободными радикалами и молекулами  $NO_2$ , что приводит к некоторому возрастанию степени очистки.

Влияние примеси  $SO_2$  на процесс конверсии оксидов азота  $NO_x$  при воздействии импульсных электронных пучков внешне выглядит аналогично: наличие малых концентраций диоксида серы снижает степень конверсии  $NO_x$ , тогда как повышение концентрации  $SO_2$  выше определенной приводит к некоторому ее возрастанию. Однако кинетический механизм этого эффекта остается неясным, что стимулирует дальнейшие исследования.

Работа выполнялась при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект № 271).

## Список литературы

- [1] *Валуев А.А., Каклюгин А.С., Норман Г.Э. и др. // ТВТ. 1990. Т. 28. Вып. 5. С. 995–1008.*
- [2] *Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control / Ed. B.M. Penetrante, S.E. Schultheis. NATO ASI Series. Vol. G34. Heidelberg: Springer Verlag. Berlin, 1993. Pt A, 398 p. Pt B. 397 p.*
- [3] *Jordan S. // Rad. Phys. Chem. 1988. Vol. 34. N 1–3. P. 21–28.*
- [4] *Matzing H. // Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control / Ed. B.M. Penetrante, S.E. Schultheis. NATO ASI Series. Vol. G34. Heidelberg; Berlin: Springer Verlag, 1993. Pt A. P. 59–64.*
- [5] *Герасимов Г.Я., Герасимова Т.С., Макаров В.Н., Фадеев С.А. // ХВЭ. 1996. Т. 30. № 1. С. 34–38.*
- [6] *Potapkin B.V., Deminsky M.A., Fridman A.A., Rusanov V.D. // Rad. Phys. Chem. 1995. Vol. 45. N 6. P. 1081–1088.*
- [7] *Герасимов Г.Я., Герасимова Т.С., Фадеев С.А. // ХВЭ. 1996. Т. 30. № 6. С. 410–413.*
- [8] *Kuznetsov D.L., Mesyats G.A., Novoselov Yu.N. // Noval Applications of Lasers and Pulsed Power / Ed. R.D. Curry. SPIE 2374. 1995. P. 142–145.*
- [9] *Кузнецов Д.Л., Месяц Г.А., Новоселов Ю.Н. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 6. С. 845–852.*
- [10] *Денисов Г.В., Новоселов Ю.Н., Ткаченко Р.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 4. С. 52–56.*
- [11] *Nakagawa Y., Kawauchi H. // Jap. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 91–94.*
- [12] *Гарусов К.А., Кузнецов Д.Л., Новоселов Ю.Н., Уварин В.В. // ПТЭ. 1992. Вып. 3. С. 180–184.*
- [13] *Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Изд-во стандартов, 1981. 132 с.*
- [14] *Худякова Е.А., Крешков А.П. Теория и практика кондуктометрического анализа. М.: Химия, 1976. 304 с.*
- [15] *Баранчиков Е.И., Бельский Г.С., Денисенко В.П. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 120–124.*
- [16] *Лушин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.*
- [17] *Смирнов Б.М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978. 176 с.*
- [18] *Вирин Л.И., Джагацянцян Р.В., Карачевцев Г.В. и др. Ионно-молекулярные реакции в газах. М.: Наука, 1979. 547 с.*
- [19] *Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Наука, 1974. 558 с.*
- [20] *Кондратьев В.Н. Константы скорости газофазных реакций. М.: Наука, 1970. 351 с.*
- [21] *Денисов Г.В., Новоселов Ю.Н., Ткаченко Р.М. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 30–34.*
- [22] *Деминский М.А., Ермаков А.Н., Поскребышев Г.А. и др. // ХВЭ. 1999. Т. 33. Вып. 1. С. 44–48.*