

© 1992

ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ПУЧКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ

А.В. И г н а т ь е в, Д.Л. К у з н е ц о в,
Г.А. М е с я ц, Ю.Н. Н о в о с е л о в

Одним из эффективных способов удаления токсичных окислов азота и серы из дымовых газов (ДГ) тепловых электростанций является радиационно-плазмохимический, основанный на облучении ДГ электронным пучком. В условиях действующих электростанций нашли применение непрерывные электронные пучки с плотностью тока 10^{-9} – 10^{-5} А/см² [1, 2]. Опыт эксплуатации пилотных установок [3] показывает, что этот способ очистки позволяет снизить концентрацию окислов серы более чем на 95%, а окислов азота – более чем на 80%. Широкое применение способа сдерживается высоким уровнем энергозатрат, что обусловлено значительной энергетической ценой \mathcal{E} удаления одной токсичной молекулы. Например, для окислов серы $\mathcal{E}=8$ – 15 эВ/мол [1, 2]. В данном сообщении показано, что применение импульсных электронных пучков с более высокой плотностью тока позволяет значительно, примерно на порядок, снизить величину \mathcal{E} , а следовательно, и общих энергозатрат до уровня, удовлетворяющего требованиям промышленной реализации способа.

Эксперименты проводились с использованием ускорителя электронов с плазменным катодом, конструкция которого приведена в [4]. В ускорителях этого типа управление током генерируемого электронного пучка осуществляется с помощью изменения тока разряда, формирующего плазменный эмиттер. Генерируемый пучок имел параметры: энергия электронов 180–200 кэВ, длительность импульса на полувывоте 15 мкс, сечение пучка $4,5 \times 75$ см², диапазон изменения плотности тока $(2-20) \cdot 10^{-3}$ А/см². Исследовалось изменение концентрации окисла серы в модельной смеси атмосферного давления при комнатной температуре. Исследуемый объем составлял $10 \times 10 \times 100$ см³. Содержание компонент смеси изменялось в пределах: 76–85% N₂, 10–20% O₂, 1–5% H₂O, 1–2% SO₂. Состав смеси до и после облучения пучком контролировался с помощью масс-спектрометра, предварительно откалиброванного смесью известного состава. Облучение проводилось сериями импульсов, число импульсов в серии изменялось от 10 до 100.

Основной целью экспериментов было определение оптимальной плотности тока j_0 электронного пучка, то есть такой плотности тока, при которой реализуется минимальная величина энергетической цены \mathcal{E} . Величина \mathcal{E} определялась как

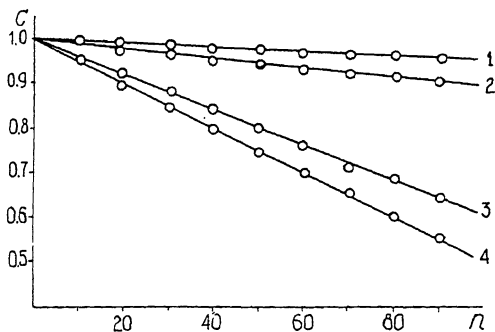


Рис. 1. Зависимости относительной концентрации SO_2 в смеси от числа импульсов облучения при различных плотностях тока пучка. Состав смеси: $N_2:O_2:H_2O:SO_2 = 84:10:5:1$. Плотность тока пучка: 1 - 2×10^{-3} А/см², 2 - 8×10^{-3} А/см², 3 - 5×10^{-3} А/см², 4 - 4×10^{-3} А/см².

$$\mathcal{E} = j\tau Dn/e[\Delta SO_2],$$

где j - плотность тока пучка (А/см²), τ - длительность импульса (C), D - доза поглощенной газом энергии на единице длины пробега электронов пучка (эВ/см), n - число импульсов в серии облучения, e - заряд электрона (Кл), $[\Delta SO_2]$ - изменение концентрации SO_2 за серию импульсов облучения (1/см³). Величина D рассчитывалась методом Монте-Карло с учетом конкретного состава смеси и реальных осциллограмм тока пучка и напряжения на ускоряющем промежутке. Погрешность измерения концентрации SO_2 не превышала 0.03, измерения энергетической цены $\Delta\mathcal{E}/\mathcal{E}$ - 0.3.

Наличие оптимальной плотности тока пучка показывает зависимость изменения относительной концентрации C окисла серы в смеси от числа импульсов облучения. Здесь C определялось как отношение концентрации SO_2 в конце серии облучения к концентрации SO_2 в исходной смеси. Рост числа импульсов облучения при постоянной j вызывает монотонное снижение C . Повышение плотности тока от 2×10^{-3} до 4×10^{-3} А/см (рис. 1, кривые 1-4) приводит к резкому снижению относительной концентрации. Дальнейшее повышение j (кривые 2, 3) приводит к замедлению скорости удаления SO_2 , и при $j \sim 10^{-2}$ А/см² относительная концентрация SO_2 изменяется практически так же, как и при $j \sim 10^{-3}$ А/см².

Энергетическая цена \mathcal{E} удаления SO_2 при изменении j также существенно меняется (рис. 2). При оптимальной плотности тока j_0 величина $\mathcal{E} = (0.7 \pm 0.2)$ эВ/мол. Помимо плотности тока на значение \mathcal{E} большое влияние оказывает изменение плотности паров воды в смеси. При $j = j_0$ повышение процентного содержания воды

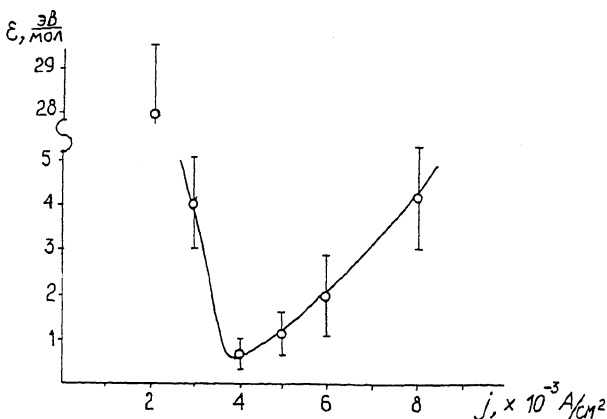


Рис. 2. Энергетическая цена удаления SO_2 в зависимости от плотности тока пучка электронов. Состав смеси: $N_2:O_2:H_2O:SO_2 = 84:10:5:1$.

от 0.3 до 5% приводит к уменьшению \mathcal{E} от 2.2 до 0.7 эВ/мол. Для других исследованных смесей характер зависимости $\mathcal{E}(j)$ с характерным минимумом сохраняется.

Полученные результаты могут быть качественно объяснены с привлечением цепного механизма окисления SO_2 в ионизованном ДГ. Электронный пучок повышенной плотности, инжектируемый в ДГ, генерирует не только свободные радикалы, участвующие в процессе удаления токсичных окислов [5], но и значительное число заряженных частиц. В электроотрицательных газах, какими являются ДГ, свободные электроны интенсивно образуют отрицательные ионы, которые могут инициировать цепные реакции окисления SO_2 [6]. Механизм удаления SO_2 в ионизованном ДГ в упрощенном виде можно представить следующим образом [7]:



где M – молекула N_2 , H_2O и др. Образованный в реакции (4) свободный электрон может вновь вступить в реакцию прилипания (1). Конкурирующими процессами, приводящими к разрушению отрицательных ионов, могут быть ион-ионная рекомбинация и отрыв электрона электронным ударом.

В области малых плотностей тока концентрация отрицательных ионов мала, и основным механизмом очистки ДГ являются реакции с участием свободных радикалов, обладающие высоким значением \mathcal{E} . При увеличении плотности тока пучка и, соответственно, кон-

центрации отрицательных ионов, подключается цепной механизм реакций (1-4). При оптимальной плотности тока, вероятно, реализуется максимальная длина цепи, электроны пучка используются наиболее эффективно. Дальнейший рост j увеличивает интенсивность разрушения отрицательных ионов в конкурирующих процессах, снижая эффективность ионного механизма очистки. Рост плотности паров воды в ДГ способствует эффективной наработке отрицательных ионов в реакции (1) и образованию серной кислоты в реакции (4).

Таким образом, полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Существует оптимальная плотность тока пучка электронов, при которой энергозатраты на очистку ДГ от SO_2 минимальны. Величина оптимальной плотности тока зависит от состава облучаемого газа и от энергии электронов пучка. В диапазоне энергий электронов 0.2-0.3 МэВ оптимальная плотность тока лежит в пределах 10^{-3} - 10^{-2} А/см².

2. Диапазон оптимальных плотностей тока достаточно просто реализуется в импульсных ускорителях электронов. Использование таких ускорителей в импульсно-периодическом режиме позволит существенно снизить затраты энергии радиационно-плазмохимического способа очистки ДГ. Частота следования импульсов определяется в конкретных условиях в зависимости от скорости потока ДГ в облучаемой зоне.

3. Вероятной причиной низких энергозатрат в оптимальном режиме является возникновение цепного механизма окисления SO_2 .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L e o n h a r d t J.M. // Rad. Phys. Chem. 1984. V. 24. N 1. P. 167-177.
- [2] T o k u n a g a O., S u z u k i N. // Rad. Phys. Chem. 1984. V. 24. N 1. P. 145-165.
- [3] F r a n k N., H i r a n o S., K a w a m u r a K. // Rad. Phys. Chem. 1988. V. 31. N 1-3. P. 57-82.
- [4] Г а р у с о в К.А., К у з н е ц о в Д.Л., Н о в о с е л о в Ю.Н., У в а р и н В.В. // ПТЭ. 1922. № 3. С. 180-182.
- [5] P e r s o n J.C., H a m D.O. // Rad. Phys. Chem. 1988. V. 31. N 1-3.
- [6] П о т а п к и н Б.В., Р у с а н о в В.Д., Ф р и д м а н А.А./ ДАН СССР. 1989. Т. 308. № 4. С. 897-900.
- [7] K u z n e t s o v D.L., M e s y a t s G.A., N o v o s e l o v Yu.N. In: Proc. 9 Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Washington, 1992. P. 405.

Институт электрофизики
УрО РАН,
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
1 ноября 1992 г.