

03;04;12

Удаление паров стирола из потока воздуха с помощью стримерной короны

© Ю.Н. Новоселов, Ю.С. Сурков, И.Е. Филатов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 19 января 2000 г.

Представлены результаты экспериментального исследования разложения паров стирола в воздухе с помощью стримерного коронного разряда с длительностью импульса 60 ns. Получены эмпирические выражения, позволяющие прогнозировать затраты энергии при необходимой степени очистки в зависимости от начальной концентрации стирола и содержания кислорода в азотно-кислородной смеси. Предложено уравнение для расчета затрат энергии, позволяющее систематизировать опыт по очистке воздуха от вредных веществ.

Производство пластических масс и изготовление изделий из них сопровождается вентиляционными выбросами воздуха, загрязненного парами летучих органических соединений (ЛОС). Низкая концентрация последних затрудняет использование традиционных методов их удаления (например, каталитическое дожигание). Для удаления ЛОС из воздуха перспективными являются методы, использующие обработку загрязненного воздуха электронными пучками или различного типа разрядами [1,2]. Показано [3], что применение импульсных электронных пучков позволяет удалять ЛОС с небольшими затратами энергии, но связано с рядом технических проблем, например необходимостью обеспечения радиационной защиты от тормозного излучения. Один из наиболее простых и эффективных методов состоит в обработке воздуха импульсным разрядом типа стримерной короны.

В качестве объекта для исследования был выбран стирол — мономер, использующийся для производства полистирола — основного компонента многих пластмасс и композитных материалов. Современные технологии его производства сводят к минимуму его выбросы в воздух, однако полностью не исключают их. Для проведения исследований использовался стримерный коронный разряд с длительностью импульса напряжения на полувывоте 60 ns, амплитудой тока 100–120 А и напряжения 70–100 kV. Генератор импульсов высокого напряжения (ГИН)

построен по схеме индуктивного накопителя энергии с полупроводниковым прерывателем тока, аналогичной описанной в [4]. Разрядная камера представляла собой цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 120 mm, длина активной зоны составляла 460 mm. По оси цилиндра натянута проволока диаметром 0.5 mm, к одному концу которой подводилось импульсное напряжение. Конструкция ГИНа позволяла менять полярность выходного напряжения. Частота следования импульсов составляла 20 Hz.

С помощью встроенного вентилятора в камере моделировался поток воздуха со скоростью до 0.2 m/s. Циркуляция воздуха осуществлялась по замкнутому контуру, общий объем которого был равен $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Таким образом осуществлялось моделирование многоступенчатой обработки газа стримерным разрядом. Кроме того, такая схема за счет усреднения концентрации ЛОС в обрабатываемом воздухе позволяла увеличить воспроизводимость опытов и снизить погрешность определения концентрации ЛОС. Измерение концентрации примеси осуществлялось как до облучения, так и в конце каждой серии из 1000 импульсов отбором проб смеси. Далее стирол поглощался в адсорбционной трубке и экстрагировался гексаном, готовый перпарат анализировался методом жидкостной хроматографии с использованием УФ детектора на длине волны 208 nm. Погрешность определения концентрации примеси не превышала 5% в диапазоне содержания примеси 100–1000 ppm и 12% в диапазоне 10–100 ppm.

В опытах использовались модельные смеси на основе азота и кислорода $\text{N}_2 : \text{O}_2 = 80 : 20$ при атмосферном давлении и комнатной температуре, концентрация паров стирола изменялась от 100 до 600 ppm (т.е. от 100 до 600 молекул примеси на 10^6 молекул основной газовой смеси).

При проведении опытов в смеси, моделирующей атмосферный воздух, оказалось, что уменьшение концентрации паров стирола с ростом числа импульсов, т.е. с увеличением вложенной в газ энергии, носит экспоненциальный характер. По-видимому, эта закономерность должна соблюдаться для большинства ЛОС при их малых концентрациях, что типично для реальных газовых выбросов. Действительно, в таких условиях вероятность взаимодействия молекул ЛОС между собой по сравнению с вероятностью взаимодействия с другими частицами, например с молекулами, атомами и другими формами кислорода, крайне мала.

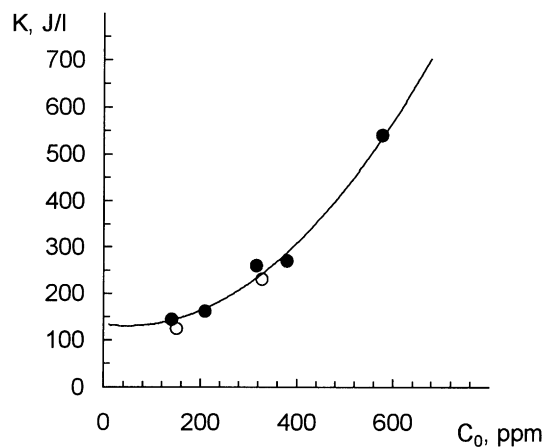


Рис. 1. Зависимость коэффициента K от начальной концентрации паров стирола $[C_0]$.

Обработка результатов показала, что эффективность процесса удаления ЛОС может быть охарактеризована энергетическим коэффициентом K , который находится методом наименьших квадратов из экспериментальных зависимостей:

$$\ln([C]_0/[C]) = W/K, \quad (1)$$

где $[C]_0$ — начальная и $[C]$ — текущая концентрации примесей, W — удельная энергия, вложенная в газ от разряда (J/l).

Результаты экспериментов для различных начальных концентраций стирола при степени очистки 90% приведены на рис. 1. Здесь черными точками отмечены результаты, полученные при отрицательной полярности импульсного напряжения, светлыми точками — при положительной полярности. Видно, что в каждом случае процесс удаления примеси подчиняется зависимости (1), при этом коэффициент K не зависит от полярности прикладываемого напряжения. Видно также, что коэффициент K зависит от начальной концентрации, что фактически свидетельствует об отклонении зависимости K от C_0 в области больших концентраций ЛОС. Следует отметить, что точное выполнение выражения (1) означает наличие первого макрокинетического порядка

реакции удаления паров стирола. Это возможно лишь в том случае, когда концентрация всех остальных компонентов ионизованного воздуха, участвующих в процессах удаления ЛОС, постоянна, т. е. находится в избытке по сравнению с C_0 .

Из зависимости, приведенной на рис. 1, следует, что при уменьшении концентрации удаляемого ЛОС до величин, близких к нулю, количество энергии для достижения необходимой степени очистки стремится к определенной, ненулевой величине. Из зависимости на рис. 1 можно предположить, что для уменьшения количества стирола в e раз при его начальной концентрации менее 100 ppm необходимая величина вводимой в газ энергии составляет около 100 Дж. Это весьма большая величина, так как, например, использование электронного пучка позволяет достичь того же эффекта при вкладах энергии, в 5–7 раз меньших [3]. Конечно, найденные таким образом константы K в какой-то степени индивидуальны для конкретной установки, однако именно их использование и позволяет сравнивать эффективность различных установок.

Увеличение коэффициента K при росте начальной концентрации паров стирола C_0 (рис. 1) можно объяснить плавным переходом порядка реакции от первого к нулевому. В этом случае концентрация генерируемых в ионизованном воздухе активных частиц сравнима с C_0 или меньше, т. е. концентрация паров стирола находится в избытке, и пренебрегать изменением количества активных частиц нельзя. На процесс удаления ЛОС также могут оказывать влияние продукты их разложения, которые могут перехватывать на себя значительную часть активных частиц. Однако при уменьшении концентрации ЛОС до значений, типичных для реальных газовых выбросов, концентрация активных частиц всегда будет сравнительно велика.

Основным механизмом удаления стирола из ионизованного воздуха можно считать процесс окисления его паров активными формами кислорода. Для изучения влияния кислорода на процесс удаления стирола были выполнены эксперименты в смесях, содержащих различные концентрации O_2 . Опыты проводились при положительной полярности импульса напряжения, подаваемого на разрядный промежуток. Результаты представлены на рис. 2 в виде зависимости коэффициента K от концентрации кислорода $[O_2]$. Приведенная зависимость показывает, что коэффициент K пропорционален квадратному корню концентрации кислорода $K \sim 1.1 \cdot 10^3 [O_2]^{1/2}$. Это позволяет записать общее

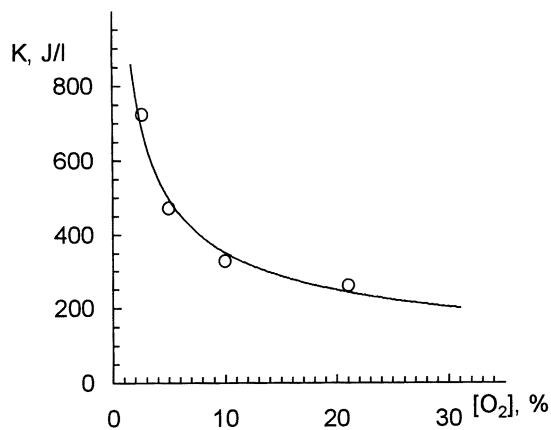


Рис. 2. Зависимость коэффициента K от концентрации кислорода в смеси. Начальная концентрация паров стирола $[C_0] = 200$ ppm.

макрокинетическое уравнение процесса в виде

$$d[C]/dN = -A[C][O_2]^{1/2}, \quad (2)$$

где A — некий обобщенный коэффициент. Уравнение (2) фактически означает, что основным процессом удаления стирола должен быть процесс с участием атомарного кислорода или озона, который также образуется при участии атомарного кислорода.

Найденные закономерности и численные коэффициенты позволяют прогнозировать параметры очистной установки при заданных начальных концентрациях паров стирола, расходе обрабатываемого воздуха и требуемой степени очистки. Например, для оценки производительности процесса очистки можно использовать следующие выражения, полученные из (1):

$$V = -P/[K \cdot \ln(1 - \eta)], \quad (3)$$

$$P = -V \cdot K \cdot \ln(1 - \eta). \quad (4)$$

Здесь V , m^3/s — расход очищаемого потока газа; P , kW/m^3 — мощность, вводимая в газ; $\eta = 1 - [C]/[C_0]$ — требуемая степень очистки; $[C_0]$ — заданная начальная концентрация ЛОС в газе, $[C]$ — требуемая

конечная концентрация ЛОС. Формулы (3) и (4) позволяют при заданных концентрациях примеси и расходе очищаемого газа оценить необходимую мощность, вводимую в газ стримерным разрядом, для получения требуемой степени очистки. Эти параметры являются ориентировочными данными для проектирования генератора импульсов напряжения и конструкции газоразрядного реактора.

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментального исследования процесса удаления паров стирола из воздуха при его обработке стримерным коронным разрядом. Найденные закономерности позволяют получить аппроксимационные выражения для прогнозирования параметров очистных установок.

Список литературы

- [1] *Neau E.L.* // IEEE Transaction on plasma science. 1994. V. 22. P. 2–10.
- [2] *Kusnetsov D.L., Mesyats G.A., Novoselov Yu.N.* // In Proc.: Novel Appl. of Lasers and Pulsed Power. 1995. San Jose, USA. P. 142–146.
- [3] *Новоселов Ю.Н., Филатов И.Е.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 16. С. 35–39.
- [4] *Lyubutin S.K., Mesyats G.A., Rukin S.N., Slovikovskii B.G.* // In Proc.: 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, Maryland, USA. 1997. V. 2. P. 992–998.