

03;04;12

Плазмодинамический озоногенератор

© Ю.Н. Гордеев, В.А. Огуречников, Ю.Л. Чижов

Институт проблем механики РАН, Москва

E-mail: ogur@ipmnet.ru

В окончательной редакции 8 мая 2009 г.

Экспериментально исследовано образование озона в низкотемпературном сверхзвуковом потоке смеси воздуха и частично диссоциированного кислорода, подаваемого из разрядного плазмотрона. При массовой доле кислорода 1.1% от общего расхода через озоногенератор получен поток озоновоздушной смеси с содержанием озона $4.88 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, при удельных затратах электроэнергии на синтез озона 25.8 MJ/kg. Обеспечивая эти параметры, озоногенератор работал десятки минут.

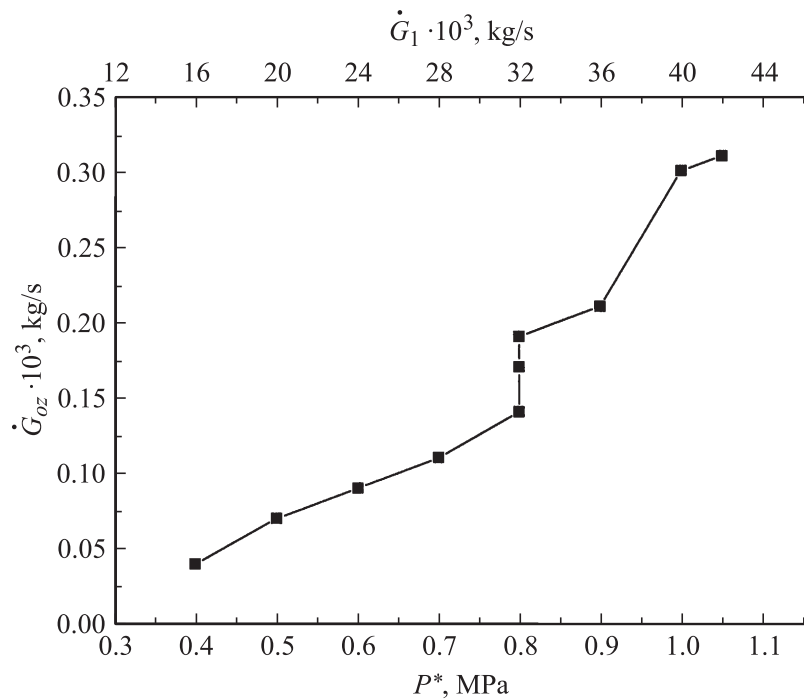
PACS: 52.25.Kn, 82.33.Xj

Современный промышленный способ получения газообразного озона базируется на процессе образования озона при воздействии барьерного разряда на кислородсодержащие газовые смеси [1,2]. При относительной простоте и надежности этого типа озоногенераторов все они обладают одним серьезным недостатком — очень низким уровнем объемной озонопроизводительности

$$F = \dot{G}_{oz} / V \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}),$$

где \dot{G}_{oz} — секундная производительность (kg/s) озоногенератора, V — суммарный объем электроразрядных ячеек озоногенератора (m^3). Для упомянутого типа озоногенераторов характерно $F = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. В работах [3,4] был предложен и теоретически проанализирован другой, названный нами плазмодинамическим, способ получения озона, который образуется при смешении сверхзвуковых струй частично диссоциированного кислорода из плазмотрона и воздуха в условиях глубокого газодинамического охлаждения.

Расчет показал возможность получения значительных концентраций озона на выходе из плазмодинамического озоногенератора. Использование плазмотрона гарантировало существенное увеличение объемной



Экспериментальная зависимость выхода озона \dot{G}_{oz} от расхода \dot{G}_1 воздуха и его полного давления P^* в плазмодинамическом озоногенераторе.

озонопроизводительности F , крайне важной для создания компактных озоногенераторов большой мощности.

В работе приводятся первые экспериментальные результаты, полученные при испытании плазмодинамического озоногенератора. Опыты проводились на экспериментальной установке непрерывного действия. В качестве реактора озона служила прозрачная цилиндрическая камера, в которой смешивались и взаимодействовали сверхзвуковые струи частично диссоциированного кислорода и воздуха (кварцевая трубка диаметром 0.013 м и длиной 0.22 м), переходящая в конический дозвуковой диффузор. Протонная часть присоединялась к вытяжке и была снабжена мановакуумметрами, позволяющими регистрировать давление

в области начала смешения P_1 и за диффузором P_2 (которое было немного выше атмосферного). Помимо этого в конце дозвукового диффузора в потоке размещался термометр для измерения температуры T^* озонородной смеси и осуществлялся непрерывный отбор пробы для измерения концентрации озона фотооптическим методом. Для этого использовалась термобаростатированная проточная кювета, снабженная кварцевыми окнами с UV -светофильтром. Изучение от высокочастотной ртутной лампы (95% мощности находится в области 253.6 nm), прошедшее через кювету, регистрировалось фотоэлементом марки Ф-1. При измерениях концентрации озона сечение поглощения σ принималось равным $1.293 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{Pa}$ [5]. В качестве источника частично диссоциированного кислорода использовался электродуговой плазмотрон с вихревой стабилизацией дуги и водяным охлаждением. Измерение тока I , напряжения U , расхода охлаждающей воды \dot{G}_w (kg/s) и разности температур Δt (K) охлаждающей воды на входе и выходе позволяло определить энтальпию плазменной струи на выходе из плазмотрона по формуле

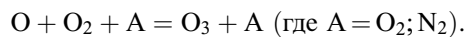
$$J = IU - G_w C_p \Delta T,$$

где $C_p = 4.19 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ — удельная теплоемкость воды, а также КПД η плазмотрона

$$\eta = (J/IU) \cdot 100\%.$$

В ходе экспериментов было установлено, что наилучшие результаты по выходу озона наблюдались при следующих параметрах работы плазмотрона: расход кислорода $\dot{G}_2 = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$, $I = 32 \text{ A}$, $U = 140 \text{ V}$, $\eta = 78\%$, которые в дальнейшем поддерживались неизменными. Как и ожидалось, эти условия соответствовали максимально достижимым в наших опытах значениям удельной энтальпии плазменной струи $H = J/\dot{G}_2 = 7.23 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. Пользуясь известной методикой расчета равновесного состава, были определены: температура плазмы $T_m = 3260 \text{ K}$, средний молекулярный вес $\mu_m = 25.5$, степень диссоциации кислорода $\beta = 0.39$ при давлении $P_1 = 25 \text{ kPa}$. На рисунке приведена зависимость выхода озона \dot{G}_{oz} от расхода воздуха \dot{G}_1 . Наибольший выход озона был получен при расходе воздуха $\dot{G}_1 = 4.18 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$ с полным давлением перед соплом $P^* = 1.05 \text{ MPa}$, которое приближалось к предельным техническим возможностям нашей установки.

При уменьшении расхода воздуха наблюдалось сначала плавное снижение выхода озона, а при давлении $P^* = 0.8$ МПа, когда происходило скачкообразное заклинивание сверхзвукового потока в реакторе с переходом в дозвуковой режим, чему сопутствовало резкое увеличение статического давления P_1 от 25 до 48 кПа, выход озона практически падал до нуля. Максимальная концентрация озона, достигнутая в этих экспериментах, составила $4.88 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Озонопроизводительность озоногенератора $\dot{G}_{oz} = 1.74 \cdot 10^{-4}$ кг/с, удельная объемная озонопроизводительность $F = 5.81$ кг/м³ · с, удельное энергопотребление $E = 10^{-6}IU/\dot{G}_{oz} = 25.8$ МДж/кг озона. Весовая доля кислорода, потребляемая озоногенератором по отношению к общему расходу, равнялась 1.1%. Обеспечивая эти параметры, озоногенератор работал десятки минут. Поскольку в плазмодинамическом озоногенераторе процессы образования атомарного кислорода в плазмотроне и получение с его участием озона в реакторе пространственно разделены, то общая эффективность работы озоногенератора в равной мере зависит от каждого из этих процессов. Анализ эффективности работы плазмотрона выходит за рамки настоящей работы, поэтому, сравнивая мольный поток озона на выходе из озоногенератора $\dot{G}_{oz}/\mu_{oz} = 3.62 \cdot 10^{-6}$ кмоль/с (где μ_{oz} — молекулярный вес озона) с потоком атомарного кислорода $\dot{G}_2\beta/\mu_m = 7.34 \cdot 10^{-6}$ кмоль/с, поступающего из плазмотрона, можно судить об эффективности работы реактора озоногенератора $\alpha = 49.4\%$. Это означает, что половина атомов кислорода, поступающих из плазмотрона в реактор озоногенератора, преобразовалась в озон. Для описания процессов, происходящих в плазмодинамическом озоногенераторе, использовалась теория сверхзвукового газового эжектора с камерой смешения постоянного сечения [6]. По измеренным значениям статического давления $P_1 = 25$ кПа, температуре торможения $T^* = 330$ К и суммарному расходу газа через реактор $\dot{G}_1 + \dot{G}_2 = 42.3 \cdot 10^{-3}$ кг/с были найдены число Маха потока в области завершения смешения компонентов $M = 2.31$ и статическая температура потока $T = 160$ К. При этих условиях значительная часть атомарного кислорода, поступающего из плазмотрона, участвовала в реакции образования озона



В случае перехода течения от сверхзвукового к дозвуковому $M = 1$ температура потока увеличивалась до 270–290 К и процесс потери ато-

мов кислорода без образования озона в реакции $O + O + A = O_2 + A$ стал доминирующим.

Результатом настоящей работы можно считать создание озоногенераторов нового типа — плазмодинамических. Объемная озонопроизводительность этого генератора уже сейчас в 500–700 раз превосходит современные промышленные образцы и в 2–2.5 раза по уровню удельного энергопотребления. Главной задачей дальнейших исследований является повышение концентрации озона на выходе генератора до уровня в $15\text{--}20 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору физ.-мат. наук В.А. Дудкину, ознакомившемуся с работой и сделавшему ряд полезных замечаний.

Список литературы

- [1] *Лопатин В.В., Сквирская И.И.* // Изв. Томского государственного университета. 2003. Т. 306. № 1. С. 128.
- [2] *Вигдорович В.Н., Исправников Ю.А., Нижаде-Гавгани Э.А.* Проблема озонопроизводства и озонобработки и создание озоногенераторов второго поколения. Москва (Шатура)–Санкт-Петербург (Колпино), научно-техническое экспресс-издание, 1994.
- [3] *Быстрова Т.В., Столяревский А.Я., Чижов О.Л., Чугунова Г.П.* // Химическая физика. 1995. Т. 14. № 4. С. 119.
- [4] *Патент RU № 2023654.*
- [5] *Griggs M.* // J. Chem. Phys. 1968. V. 49. N 2. P. 857.
- [6] *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969.