

02;03;12

## Образование озона в сверхзвуковых соплах

© О.А. Гордеев<sup>2</sup>, В.Н. Макаров<sup>1</sup>, В.А. Павлов<sup>1</sup>, О.П. Шаталов<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия<sup>2</sup> Московский радиотехнический институт РАН, 113519 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 31 марта 1997 г.)

Теоретически и экспериментально исследовано образование озона при истечении кислорода из сверхзвукового сопла. Анализирована кинетика образования атомарного кислорода в электрическом разряде в сопле. Поставлен эксперимент с использованием оптимального сопла, в сверхзвуковой части которого организован электрический разряд. Показано, что наибольшее содержание озона на выходе из сопла достигается при создании избыточной концентрации атомов кислорода именно в сверхзвуковой части сопла.

### Введение

Стандартный метод получения озона состоит в использовании проточных разрядных систем (озонаторов), где озон образуется в результате рекомбинации частично диссоциированного в разряде кислорода (см., например, [1]). При всех достоинствах этого метода (простота, экономичность) остаются вопросы повышения выхода молекул  $O_3$  на единицу начальной массы газа (кислорода, воздуха, смесей кислорода с инертным разбавителем) и повышения производительности озонатора. Целенаправленное газодинамическое управление параметрами потока с использованием профилированных сопел открывает здесь дополнительные возможности. В частности, в [2] было показано, что при охлаждении в сверхзвуковом сопле частично диссоциированного кислорода при температурах порядка 1000 К образуется озон в концентрациях, на много порядков превышающих равновесные. Абсолютные концентрации озона, оцененные в этой работе, не превышали, однако,  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что значительно уступает концентрациям, получаемым в обычных условиях. В [3] была поставлена и решена задача оптимизации сверхзвуковой части сопла и параметров газа перед ним с целью получения максимального выхода озона при условии равновесного разогрева кислорода в смеси с инертным разбавителем перед входом в сопло. Хотя оцененные в этой работе концентрации озона достигали  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , одновременно стало очевидным, что получить достаточно высокий выход озона по такой схеме затруднительно. При низкой начальной температуре газовой смеси мала исходная равновесная концентрация атомов  $O$  и, как следствие, мала относительная концентрация образующихся молекул  $O_3$ , а при высоких температурах затруднен процесс образования озона.

В работах [4,5] была рассмотрена ситуация, когда на входе в сопло или в его сверхзвуковой части создается избыточная концентрация атомарного кислорода (например, с помощью электрического разряда). Было показано, что наибольший эффект достигается при создании избыточной концентрации атомов именно в сверхзвуковой части сопла.

В данной работе этот подход находит дальнейшее развитие путем анализа более широкого диапазона начальных температур перед входом в сопло (снижение температуры газа перед соплом до комнатной), кинетики образования атомарного кислорода в электрическом разряде в сопле, а также постановки эксперимента с использованием оптимального профиля сопла и создания электрического разряда в его сверхзвуковой части. Задача работы — поиск оптимальных характеристик сопла, параметров газа и, в частности, оптимальных концентраций атомов  $O$ , обеспечивающих максимальный выход озона, и создание на этой основе экспериментального макета такого озонатора.

### Оптимизация параметров газодинамического озонатора

Использованная в работе модель химических реакций подробно описана в работе [4]. Там же приведен полный набор констант скоростей реакций с обоснованием их выбора.

При решении задачи оптимизации рассматривался класс плоских клиновидных сопел с углом полураскрытия  $\Theta$ , критическим сечением  $h_*$  и длиной  $L$ . Предполагалось, что после расширения в таком сопле газовый поток поступает в плоскопараллельный канал длиной  $L_1$ , на стыке сопла с плоским каналом контур закруглялся для того, чтобы не возникали ударные волны в плоском канале. Рассматривалась задача оптимизации с целью получения максимальных значений молярной доли озона  $\xi_3$ . Если использовать фиксированный набор значений начального давления  $p_0$ , то параметрами оптимизации будут величины  $\xi_1$ ,  $\xi_1'$ ,  $\xi_2$ ,  $T_0$ ,  $\alpha$ ,  $L$ ,  $L_1$ ,  $l'$ , где  $\xi_1$ ,  $\xi_1'$  — молярные доли атомов  $O$  перед входом в сопло и непосредственно за скачком концентрации в сверхзвуковой части сопла;  $\xi_2$  — концентрация молекул  $O_2$  перед входом в сопло;  $T_0$  — начальная температура газа;  $\alpha = 2 \text{ tg } \Theta / h_*$ ;  $l'$  — расстояние от геометрической критики, на котором расположен скачок концентрации частиц  $O$  и  $O_2$ . При этом на скачке выполняются условия

$\gamma_1 + \gamma_2 = \gamma'_1 + \gamma'_2$ ,  $\gamma'_1 > \gamma_1$ . Здесь  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma'_1, \gamma'_2$  — массовые доли атомов и молекул кислорода до (без штриха) и после (со штрихом) скачка. Дозвуковая часть не оптимизировалась и рассматривался фиксированный контур с радиусом кривизны  $R = 2h_*$ . Поиск оптимума осуществлялся методом конфигураций [6].

Как было показано в [4], основной эффект в производстве озона дает скачок концентрации атомов O именно в сверхзвуковой части сопла: при  $p_0 = 10 \text{ atm}$  и  $T_0 = 827 \text{ K}$ , профиле сопла  $\alpha = 4.64 \text{ cm}^{-1}$ ,  $l' = 0.97 \text{ cm}$  и  $\xi'_1 = 7.86\%$  оптимальное значение мольной доли озона  $\xi_3 = 1.905\%$ .

Отметим, что найденные в [4] оптимальные условия соответствуют вдуванию в сопло достаточно горячего газа с температурой 827 K. Однако использование метода оптимизации, представляющего синтез случайного и детерминированного вариантов поиска, позволило обнаружить наличие второго максимума в газодинамическом генераторе озона. Существование второго экстремума видно из рис. 1. Здесь приведены значения концентрации озона (а.и.) при вариации начальной температуры  $T_0$  от 1300 до 300 K, а значения остальных параметров соответствуют указанным выше условиям при  $p_0 = 10 \text{ atm}$  и  $T_0 = 827 \text{ K}$ . На рис. 1 за единицу принято значение концентрации озона при этих условиях ( $\xi_3 = 1.905\%$ ). При уменьшении  $T_0$  от оптимального ( $T_0 = 827 \text{ K}$ ) концентрация озона значительно уменьшается из-за разогрева потока за счет реакций рекомбинации, а длина плоскопараллельного участка  $L_1$  и другие параметры при  $T_0 < 827 \text{ K}$  уже не будут оптимальными. Однако при температуре  $T_0 < 500 \text{ K}$  концентрация озона вновь начинает расти и это продолжается вплоть до температур  $T_0 \cong 300 \text{ K}$ . Таким образом, немонотонность изменения температуры при наличии скачка концентрации атомов O приводит к появлению второго максимума концентрации молекул озона при низких начальных температурах  $T_0$ . В связи с этим был осуществлен поиск наиболее благоприятных условий образования молекул озона в сверхзвуковом сопле при низкой начальной температуре  $T_0 = 300 \text{ K}$  и давлении  $p_0 = 2 \text{ atm}$ . Кроме того, была упрощена постановка задачи, а именно считалось, что скачок концентрации атомов O один и имеет место

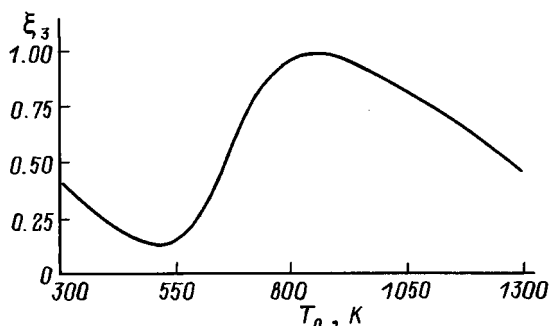


Рис. 1. Зависимость концентрации озона от начальной температуры газа.

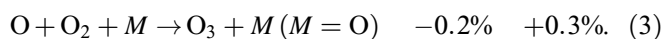
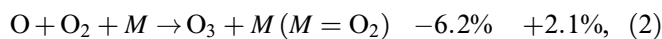
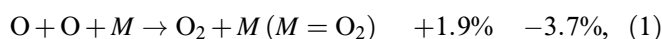
Таблица 1. Оптимизация параметров соплового озонатора

$n$	$\xi'_1, \%$	$\alpha, \text{ cm}^{-1}$	$l', \text{ cm}$	$L, \text{ cm}$	$\xi_3, \%$
1	0.50	0.63	0.64	5.0	0.49
2	1.00	0.64	0.64	5.0	0.96
3	2.00	0.65	0.71	5.0	1.85
4	4.00	0.67	0.73	5.0	3.18
5	4.92	0.70	0.95	5.0	3.39

только в сверхзвуковой части сопла ( $\xi_1 = 0$ ), а плоскопараллельная часть сопла отсутствует ( $L_1 = 0$ ). Следовательно, поиск оптимума осуществлялся для плоского клиновидного сопла с параметрами  $\alpha, L, l', \xi'_1$ . Результаты решения этой задачи приведены в табл. 1. Здесь при пяти фиксированных (варианты  $n = 1 \dots 5$ ) значениях  $\xi'_1$  приведены оптимальные значения параметров  $\alpha, L, l', \xi_3$ . Оказалось, что при  $L > 5 \text{ cm}$  во всех случаях значение  $\xi_3$  практически не зависит от  $L$ , поэтому в таблице приведены данные при  $L = 5 \text{ cm}$ . Из табл. 1 видно, что наилучшие значения  $\alpha, l'$  также слабо меняются по мере роста  $\xi'_1$ . Оптимальным условиям по всей совокупности параметров соответствуют данные таблицы при  $n = 5$ . Эти данные и, в частности, значение  $\xi_3 = 3.39\%$  заметно лучше характеристик первого максимума в распределении концентрации образующегося озона (1.905%), наблюдаемого при вдуве в сопло горячего кислорода.

Отметим, что основными химическими процессами, определяющими кинетику образования озона в этих условиях, являются реакции

$$m_j = 0.5 \quad m_j = 2.0$$



Здесь справа от реакции указаны отклонения значений  $\xi_3$  при вариации константы скорости реакции в виде  $K_j = m_j K_j^0$ . Первый столбец чисел соответствует значению  $m_j = 0.5$  (т.е. уменьшению константы скорости реакции в два раза), а второй —  $m_j = 2$ . При вариации других констант отклонение концентрации озона намного меньше.

На рис. 2 приведено распределение концентрации основных компонент и температуры  $T$  вдоль сопла  $S$  (штриховая линия) для варианта  $n = 2$  ( $\xi'_1 = 1\%$ ) из табл. 1. Вертикальная линия на рис. 2 соответствует плоскости скачка концентрации атомов O. В этих условиях практически вся избыточная концентрация атомов O уходит на образование молекул озона в результате рекомбинации  $\text{O} + \text{O}_2 + M \rightarrow \text{O}_3 + M$  и лишь небольшая доля уходит на образование молекул  $\text{O}_2$ . Видно, что рекомбинация в целом приводит к незначительному

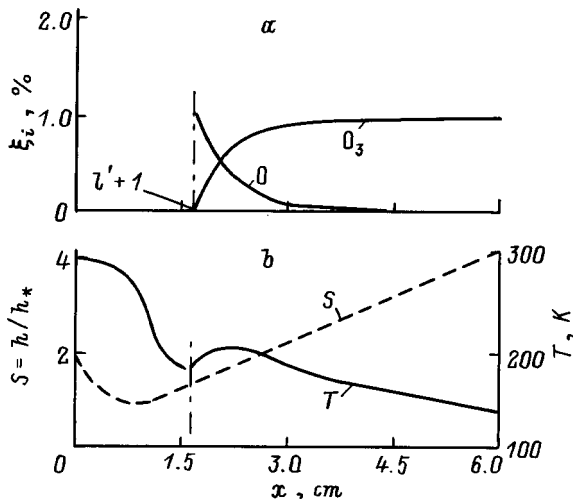
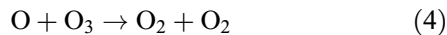


Рис. 2. Распределение концентрации основных компонентов (а) и температуры газа вдоль сопла (b).

повышению температуры за скачком 30–40 К, так что распада образовавшихся молекул озона не происходит.

Причины такого поведения рассматриваемой системы кроются в характере зависимости констант скоростей рассматриваемых реакций от температуры (рис. 3). Из рис. 3 видно (кривая 4), что константа скорости увода молекул  $O_3$  в обменной реакции



мала, а константы скорости реакций (1) и (2), уводящих атомы  $O$  в молекулы  $O_2$  и  $O_3$ , таковы, что при низких концентрациях атомов  $O$  основным каналом их гибели является реакция (2). Так, при  $T \approx 200$  К (характерная температура газа в сопле при  $T_0 = 300$  К)  $K_1 = 1.72 \cdot 10^{15} \text{ cm}^6/\text{mol}^2 \cdot \text{s}$ ,  $K_2 = 4.1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^6/\text{mol}^2 \cdot \text{s}$ . Скорости соответствующих реакций  $W_1 \approx K_1 \xi_1 \xi_1$ ,

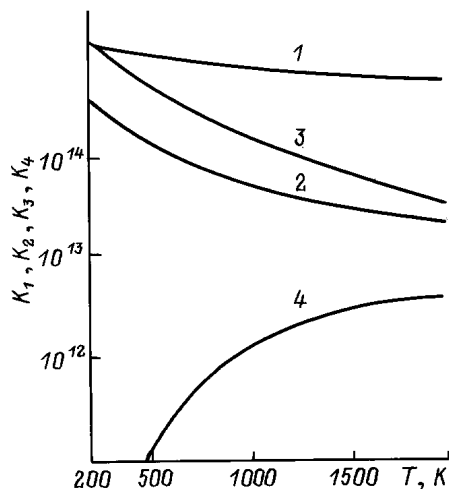


Рис. 3. Зависимость констант скоростей реакций (1–4) от температуры газа ( $K_1, K_2, K_3$  — в  $\text{cm}^6/\text{mol}^2 \cdot \text{s}$ ,  $K_4$  — в  $\text{cm}^3/\text{mol}^2 \cdot \text{s}$ ).

$W_2 \approx K_2 \xi_1 \xi_2$ , тогда

$$W_2/W_1 = K_2 \xi_1 \xi_2 / K_1 \xi_1 \xi_1 = K_2 / K_1 \xi_1 \approx 0.24 / \xi_1 \quad (5)$$

(при  $T = 200$  К и  $\xi_2 \approx 1$ ).

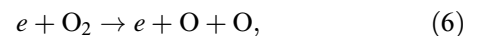
Поэтому при низких концентрациях атомов  $O$ , например при  $\xi_1 < 0.024$ , отношение скоростей реакций  $W_2/W_1 \geq 10$ , т. е. в этих условиях практически все атомы  $O$  расходятся на образование озона.

## Образование атомарного кислорода в сопловом озонаторе с применением электрического разряда

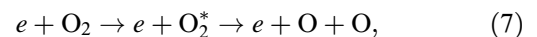
Как было показано в работе [4], оптимальным с точки зрения максимального выхода озона в сопловом озонаторе с применением электрического разряда является образование атомарного кислорода именно в сверхзвуковой части сопла. При этом, как следует из проведенного выше анализа (см. (5)), для того чтобы практически все атомы кислорода, образованные в разряде, расходовались на образование озона (оптимальный режим), их концентрация не должна превышать  $\xi_1 \approx 0.024$ . С другой стороны, существенное (более чем на порядок) уменьшение ее величины ухудшает производительность соплового озонатора. Поэтому была оценена возможность достижения указанных значений концентрации атомов  $O$  в разряде в сверхзвуковой части сопла.

Оценка значений концентрации (молярной доли) атомарного кислорода, образующегося в разряде в области между электродами проводилась следующим образом. В газовом разряде диссоциация молекул кислорода происходит в основном электронным ударом в следующих реакциях:

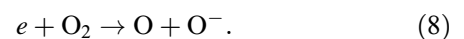
прямая диссоциация молекулы электронным ударом



диссоциация через возбуждение электронных уровней молекул, лежащих выше порога диссоциации, с последующим переходом на разлетные термы



где  $O_2^*$  — возбужденная в соответствующее электронное состояние молекула, а также диссоциативное прилипание электронов к молекулам кислорода

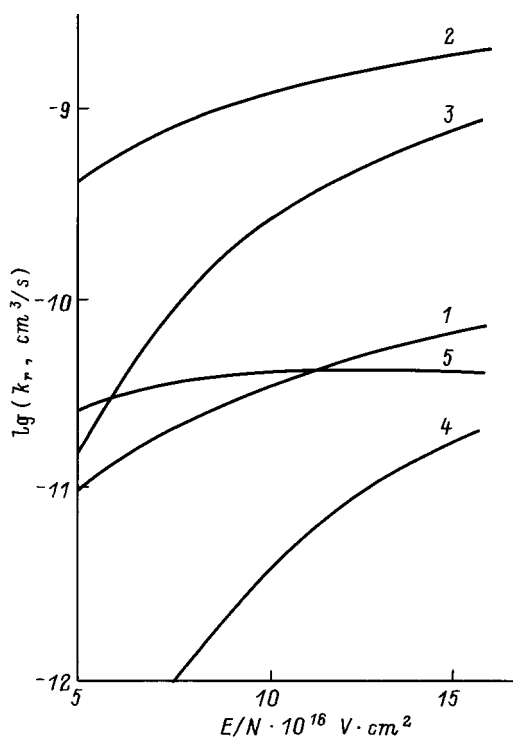


Для нахождения констант скоростей указанных реакций в приближении приведенного поля из уравнения Больцмана в виде, предложенном в работе [7], рассчитывалась функция распределения электронов по энергиям

(ФРЭЭ)  $f(\varepsilon)$ 

$$\begin{aligned} & \frac{E^2}{3} \sum_1 N_1 \sigma_{ml}(\varepsilon) \frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon} \\ & + \sum_1 \frac{2m}{M_1} N_1 \varepsilon^2 \sigma_{ml}(\varepsilon) \cdot \left[ f(\varepsilon) + \frac{k_B T}{e} \frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right] \\ & + \sum_1 N_1 B \varepsilon \sigma_{\text{rot}}(\varepsilon) \cdot \left[ f(\varepsilon) + \frac{k_B T}{e} \frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right] \\ & = - \sum_1 N_1 \sum_{ij} \int_{\varepsilon}^{\varepsilon + \varepsilon_{ij}} \sigma_{lij}(\varepsilon') \varepsilon' f(\varepsilon') d\varepsilon'. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $E$  — напряженность электрического поля;  $\varepsilon$  — энергия электрона;  $\sigma_{ml}$  — транспортные сечения рассеяния электронов на атомах и молекулах кислорода;  $N_1$  — концентрация молекул (атомов);  $m_1, M_1$  — массы электрона и молекулы (атома) соответственно;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона;  $B$  — вращательная постоянная;  $\sigma_{\text{rot}}$  — сечения возбуждения вращательных уровней молекул;  $\sigma_{lij}$  — сечения возбуждения колебательных уровней молекул и электронных уровней атомов и молекул кислорода электронным ударом;  $\varepsilon_{ij}$  — порог соответствующей реакции возбуждения. Сечения были взяты из работ [8–11]. Корректность расчетов  $f(\varepsilon)$  контролировалась по известной методике,



**Рис. 4.** Зависимость констант скоростей реакций, приводящих к образованию атомарного кислорода электронным ударом, от  $E/N$ : 1 — (6); 2 — (7), состояние  $A^3\Sigma_u^+$ ; 3 — (7), состояние  $B^1\Sigma_g^-$ ; 4 — (7), группа уровней с порогом 9.9 eV; 5 — (8). В скобках — номера реакций.

использованной, например, в работе [12], посредством сравнения зависимости дрейфовой скорости  $v_{\text{dr}}(E/N)$  и характеристической температуры электронов  $T_{\text{ch}}(E/N)$  в рассматриваемом диапазоне изменения параметра  $E/N$  со справочными данными [13].

Константы скорости реакций находились из соотношения

$$k_{ij}(E/N) = \sqrt{2/m} \int_0^{\infty} \sigma_{ij}(\varepsilon) \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (10)$$

Поскольку электрическое поле в области между расположенными в сверхзвуковой части сопла электродами неоднородно, то расчеты были проведены в широком диапазоне значений  $E/N$ , равном  $5 \cdot 10^{-16} - 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ Vcm}^2$ . Зависимости констант скоростей реакций (6)–(8), соответствующие этим условиям измерений, приведены на рис. 4. Там же для различных каналов диссоциации по реакции (7) указаны обозначения соответствующих возбужденных состояний.

Значения концентрации электронов  $n_e$  в области горения разряда оценивались для характерных значений тока разряда  $I = 25 - 150 \text{ mA}$  из закона Ома

$$j = en_e v_{\text{dr}}, \quad (11)$$

где  $j$  — плотность тока.

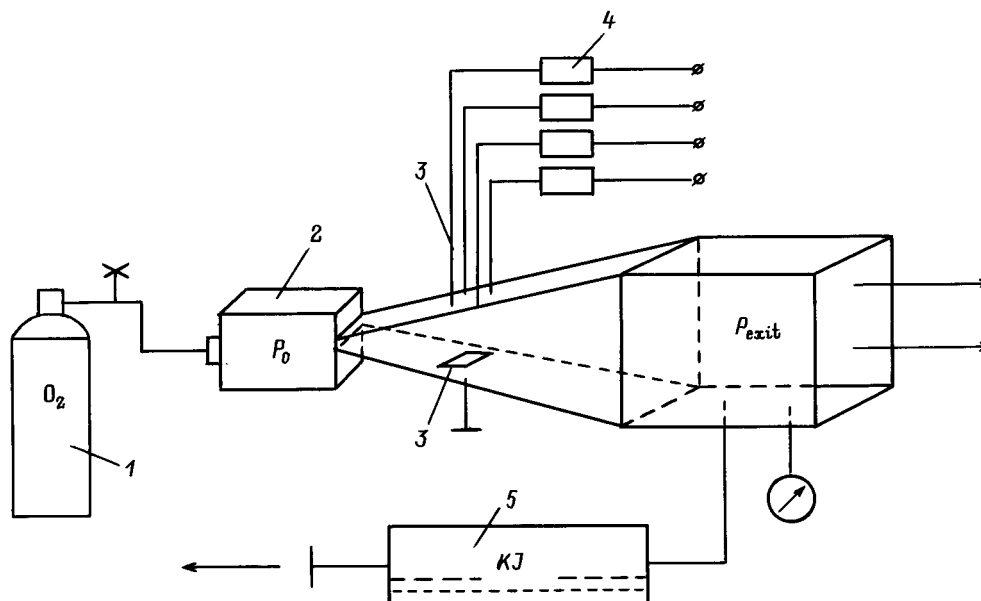
При ориентировочной площади электродов порядка  $2 \text{ cm}^2$  диапазон изменения концентрации электронов, согласно этим оценкам и приведенным значениям  $E/N$ , приблизительно равен  $n_e = 3.4 \cdot 10^9 - 4.0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

Продукты реакций, происходящих в разряде, уносятся потоком газа в сопле за малые времена  $\tau = d/V \leq 20 \text{ ns}$  ( $d$  — размер электрода вдоль потока,  $V \sim 500 \text{ m/s}$  — его скорость в промежутке между электродами), поэтому обратные реакции и влияние колебательно-возбужденных молекул при оценках не учитывались. Тогда молярную долю образующегося в разряде атомарного кислорода можно оценить из следующего выражения:

$$\xi_1 = 2 \int_0^t \sum_r k_r n_e \xi_2 dt + \int_0^t k_8 n_e \xi_2 dt, \quad (12)$$

где при суммировании индекс  $r$  относится к реакциям (6) и (7), в которых образуются два атома кислорода;  $k_8$  — константа скорости реакции (8).

Образующийся в реакции (8) отрицательный ион  $\text{O}^-$  непосредственно не приводит к образованию атома кислорода. Оценки по выражению (12) дают для концентрации атомов  $[\text{O}] = 5.3 \cdot 10^{14} - 1.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ( $\xi_1 = 0.012 - 0.262\%$ ). Следует отметить, что для конкретных расчетов необходимо одновременно решать уравнение Больцмана (9) и уравнения баланса заряженных и возбужденных частиц, как это сделано, например, в работах [14] для азота и [15] для кислорода. Тем не менее проведенные оценки показали, что значения молярной доли атомарного кислорода, которые можно



**Рис. 5.** Принципиальная схема соплового озонатора с использованием электрического разряда: 1 — баллон с кислородом, 2 — сопловый озонатор, 3 — электроды, 4 — балластные сопротивления, 5 — кювета с иодидом калия.

получить в разряде, горящем в сверхзвуковой части сопла, близки к полученным выше оптимальным для соплового озонатора значениям.

Наличие второго максимума образования озона, соответствующего вдуванию в сопло газа с температурой  $T_0 = 300$  К (рис. 1) и выполненные выше оценки концентрации атомов О в разряде инициировали проведение серии экспериментов, в которых в газодинамическом генераторе из сопла истекал молекулярный кислород при комнатной температуре, а необходимые для образования озона атомы создавались с помощью электрического разряда в сверхзвуковой части потока, как было предложено ранее в работах [4,5].

## Эксперимент. Методика и результаты

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 5. Молекулярный кислород с давлением 1–10 atm подавался из баллона на вход плоского клиновидного сверхзвукового сопла с углом раствора  $10^\circ$  и высотой критического сечения 0.4 mm. Длина и ширина сопла составляли соответственно 100 и 15 mm. Выходная часть сопла постоянно откачивалась форвакуумным насосом производительностью 20 л/с.

В сверхзвуковой части сопла поджигался поперечный стационарный разряд постоянного тока на расстоянии 10 mm от критического сечения. Верхняя и боковые стенки сопла изготовлены из кварцевого стекла, а нижняя — из стали. В верхнюю плоскость в шахматном порядке введены 9 вольфрамовых электродов, каждый из которых питался через отдельное балластное сопротивление, соединенное с источником питания.

Ток разряда варьировался в пределах  $I = 24$ –150 mA, а напряжение на электродах составляло величину 0.8–1 kV. Концентрация молекул кислорода в сверхзвуковой части сопла в области между электродами составляла от  $5.6 \cdot 10^{18}$  до  $4.4 \cdot 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$  вдоль потока газа.

Содержание озона в потоке из сопла определялось методом йодометрического титрования. В табл. 2 показаны результаты измерения концентрации озона при различных величинах тока разряда. Можно отметить линейную зависимость выхода озона от энерговклада при умеренных токах (до 70–80 mA), однако при дальнейшем увеличении тока разряда наблюдается насыщение концентрации озона. Максимальное значение содержания озона в потоке в указанных условиях составило величину 0.3%. Проведенные выше оценки значений молярной доли атомарного кислорода  $\xi_1$ , образующегося в разряде, также приведены в табл. 2. Видно, что при больших значениях тока разряда выполняется условие (5), когда практически все атомы кислорода расходятся на образование озона. В этом случае измеренные и полученные из проведенных выше оценок значения молярных долей озона хорошо согласуются между собой.

**Таблица 2.** Зависимость объемной концентрации образования озона от мощности разряда

№ опыта	$I$ , mA	$P$ , W	$\xi_3$ , % (эксперимент)	$\xi_1$ , % (расчет)
1	24	19	0.12	0.042
2	50	40	0.17	0.090
3	75	60	0.24	0.134
4	150	120	0.3	0.262

Таблица 3. Сравнительные характеристики некоторых типов озонаторов

Тип озонатора	Масса озонатора, kg	Объем, m <sup>3</sup>	Расход газа, m <sup>3</sup> /h	Концентрация озона, g/m <sup>3</sup>	Производительность по озону, g/h	Энергозатраты kWh/kg	Удельная производительность на ед. объема g <sup>3</sup> /hm <sup>3</sup>	Удельная производительность, отнесенная к расходу газа, g/hm <sup>6</sup>	Выход озона на ед. массы озонатора, g/kg	Частота тока разряда, Hz
ОПЧ-61, СССР	1876	—	100	12.5	10 000	13	—	—	5.4	2400
ОП 121, СССР	170	—	—	20	1600	22	—	—	0.95	50
Патент № 4016060, США	—	—	—	14	450	2.2	—	—	—	10 000
”Трейдгаз” моноблок-76, Франция	3000	—	—	18	2016	12	—	—	0.67	1000
Озонатор высокочастотный однотрубный Россия, МГУ	25	$1.4 \cdot 10^{-3}$	16.3	30	490	5.3	$3.4 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^4$	19.6	3000
Сопловой озонатор, Россия, Институт механики МГУ	0.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$	40	6.4	25	5.3	$1.7 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^5$	1700	Разряд постоянного тока

При изменении величины входного давления от 1 до 10 atm относительная концентрация озона практически не менялась. Расход кислорода для указанного сопла составляет величину  $1.57p_0$  (atm) g/s. При давлении газа на входе  $p_0 = 10$  atm расход равен 15.7 g/s и соответственно концентрация озона составляет 6.4 g/m<sup>3</sup>, а измеренные и полученные из проведенных выше оценок значения молярных долей озона хорошо согласуются между собой.

При изменении величины входного давления от 1 до 10 atm относительная концентрация озона практически не менялась. Расход кислорода для указанного сопла составляет величину  $1.57p_0$  (atm) g/s. Видно, что производительность озонатора можно существенно повысить, увеличивая начальное давление газа  $p_0$ . Следует отметить, что приведенная напряженность электрического поля между электродами приблизительно соответствует значению, при котором значительная часть энергии электронов в разряде расходуется в реакциях (7) [8].

## Заключение

Для оценки эффективности описываемого устройства проведен сравнительный анализ промышленных и полупромышленных установок по производству озона. Общепринятыми параметрами, характеризующими эффективность озонаторов, являются: удельная производительность озона на единицу площади разряда (g/h · dm<sup>2</sup>), удельные энергозатраты на электросинтез (kW/h · kg) и

выход озона на единицу массы озонатора (g/kg). Однако, учитывая принципиальное конструктивное отличие обычных озонаторов, использующих, как правило, цилиндрическую геометрию разряда, от описываемого устройства, разумно ввести величину удельной производительности озона на единицу объема реактора, отнесенную к расходу используемого газа. В табл. 3 приведены сравнительные характеристики некоторых промышленных и полупромышленных установок по производству озона. Наилучшими параметрами в настоящее время обладает высокочастотный озонатор разработки МГУ. Из табл. 3 видно, что этот озонатор уступает описанному в настоящей работе. Проведенные в данной работе исследования показали, что существует возможность получить удельную производительность с единицы объема реактора, почти в 5 раз превышающую производительность озонатора [1]. Удельная производительность, отнесенная к расходу кислорода, превысит соответствующую производительность озонатора [1] в 20 раз. Обращает на себя внимание очень высокий выход озона на единицу массы реактора.

В описываемом сопловом озонаторе расчетная температура в зоне реакции составляет  $-70^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что в сопле низкие температуры поддерживаются автоматически за счет расширения потока. Это дает возможность освободиться от принудительного охлаждения, что упрощает конструкцию озонатора и уменьшает его габариты. Кроме того, дальнейшее расширение потока вдоль сопла уменьшает частоту столкновений молекул и

соответственно уменьшает вероятность распада образовавшегося в разряде озона. Однако надо отметить, что существуют по крайней мере две проблемы, связанные с доставкой полученного озона к месту его применения. Первая связана с реакциями в послесвечении разряда, которые могут приводить к частичному уменьшению его концентрации. Вторая проблема связана с тем, что при торможении газ нагревается, что также приводит к снижению концентрации озона.

Дальнейшее совершенствование описываемого озонатора заключается в оптимизации состава газа и профиля сопла, а также типа и энергетических характеристик электрического разряда.

Представленные экспериментальные результаты и численные расчеты указывают на перспективность использования сверхзвуковых сопел для производства озона.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.А. Вобликовой, В.Г.Самойловичу и В.А.Шахатову за полезное обсуждение и дружескую поддержку, оказанную при выполнении данной работы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 95-01-00415.

## Список литературы

- [1] Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М.: Изд-во МГУ, 1987. 237 с.
- [2] Душин В.К., Забелинский И.Е., Шаталов О.П. Способ получения сверхравновесных концентраций озона. А.С. № 1230126 СССР. БИ. 1986. № 48. С. 288.
- [3] Кривоносова А.Э., Макаров В.Н., Шаталов О.П. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. М.: Изд-во МГУ, 1986. С. 122.
- [4] Макаров В.Н., Шаталов О.П. // Изв. АН. МЖГ. 1994. № 6. С. 139.
- [5] Макаров В.Н., Шаталов О.П. Способ получения озона в сверхзвуковом сопле. Патент РФ на изобретение № 2057708 от 10.04.1996.
- [6] Уайлд Д.Дж. Методы поиска экстремума. М.: Наука, 1967. 267 с.
- [7] Nighan W.L. // Phys. Rev. 1970. Vol. A2. N 5. P. 1989.
- [8] Исламов Р.Ш., Кочетов И.В., Певгов В.Г. Препринт ФИАН. М., 1977. № 169.
- [9] Бычков В.Л., Гордеев О.А. // Хим. физ. 1992. Т. 11. № 8. С. 1064.
- [10] Itikawa Y., Ichimura A., Onda K. et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1989. Vol. 18. N 1. P. 23.
- [11] Geltman S. // JQSRT. 1973. Vol. 13. P. 601.
- [12] Гордеев О.А., Хмара Д.В. ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 133.
- [13] Dutton J. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4. N 3. P. 577.
- [14] Бодронов А.В., Верещагин К.А., Гордеев О.А. и др. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 5. С. 666.
- [15] Бессараб А.Б., Рыбкин В.В. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 2. С. 181.