

УДК 533.9

Генерация озона в кислороде и воздухе при атмосферном давлении под действием плазменного факела СВЧ-горелки

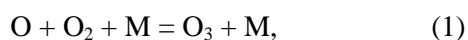
Н. А. Лукина, К. Ф. Сергейчев

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Представлены эксперименты по синтезу озона в кислороде и воздухе под действием плазменного факела СВЧ-горелки. Получены данные об образовании озона при горении факела на аргоне, гелии и азоте. Проведены оценки эффективности образования озона. Этот простой способ генерации озона может успешно применяться в медицинской практике для стерилизации инструментов и сред.

Озон (O_3) — аллотропная модификация кислорода. Озоновый пояс в стратосфере Земли защищает живую природу от вредного воздействия жесткой ультрафиолетовой (УФ) радиации Солнца. Озон как универсальный окислитель приносит пользу во многих сферах деятельности человека: в медицине, биологии, сельском хозяйстве, в химической и электронной промышленности.

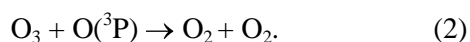
Озон образуется в результате последовательных реакций диссоциации молекулы кислорода на атомы и слияния атомов с молекулами кислорода в тройных соударениях с третьей частицей [1]:



где M — любая частица, уносящая избыток энергии.

Преобразование кислорода в озон — в целом эндотермический процесс, так как запас энергии в молекуле озона превышает энергию в молекуле кислорода на 1,48 эВ, или на 142 кДж/моль. Хотя реакция (1) сопровождается выделением теплоты, но на диссоциацию кислорода тратится существенно большая внешняя энергия. В среднем в расчете на образование молекулы озона при тройном соударении теряется дополнительно 1,1 эВ в виде тепла. Таким образом, минимально возможные затраты энергии на образование молекулы озона составляют 2,58 эВ, или 1,44 (кВт·ч)/кг.

В реальных установках выходы озона значительно ниже. Это связано с реакциями его разложения, протекающими одновременно с его образованием, при этом основной реакцией разложения обычно считают реакцию



Кинетика рождения и гибели озона в зависимости от рода источника, вызывающего диссоциацию молекулярного кислорода, описывается комплексом элементарных реакций с участием фотонов, электронов, ионов, молекул и атомов в

различных возбужденных состояниях. Множество этих реакций исчисляется десятками, их константы не всегда точно определены, поэтому результаты численного моделирования процессов, протекающих в озонаторах, не всегда адекватны реальным результатам.

Наиболее производительные сегодня озонаторы с барьерным разрядом [2, 3] имеют высокую эффективность выхода озона — до 0,2 кг/(кВт·ч) при стационарной концентрации 10—15 %. К числу явных достоинств разрядов этого типа следует отнести ограничение тока диэлектрическим барьером, что препятствует переходу разряда в стадию завершеного пробоя, обычно сопровождающегося большим выделением энергии и общим нагревом среды. Стримерные микроразряды в виде тончайших нитей на последующей за разрядом стадии диффузионного расширения атомизированного кислорода становятся источниками озона в быстроостывающей среде.

В качестве типичного примера промышленных озонаторов с барьерным разрядом можно представить озонатор Semozon[®] 090.2HP фирмы ASTeX GmbH [4] при потребляемой мощности 1,8 кВт и расходе кислорода 10 ст. л./мин, производительность прибора ~0,05 кг/(кВт·ч).

Озон — нестабильный газ, несовместимый с высокой температурой. Уже при температуре свыше 100 °С он начинает заметно распадаться до молекулярного кислорода. Распад озона происходит в результате термического разложения гомогенного характера или при контакте со стенками сосуда, а также в реакциях с радикалами и возбужденными частицами. Синтез озона за счет термической диссоциации молекулярного кислорода не оправдан, поскольку для достижения заметного, например 10%-ного содержания атомарного кислорода, газ нужно нагреть до температуры $T = 3000$ К. Но при этой температуре равновесие в реакции $O_3 \leftrightarrow O_2 + O$ сдвинуто вправо, и нужны особые меры для извлечения атомарного кислорода и самого озона.

В работе [5] исследовали образование озона в струе низкотемпературной плазмы аргона, создаваемой дуговым плазмотроном мощностью 1,5 кВт. Плазменную струю пропускали через реакционную камеру, наполняемую молекулярным кислородом. Максимальная концентрация озона, полученная на этой установке, составила 0,15 %, а выход $\leq 0,01$ кг/(кВт·ч), что примерно в пять раз меньше, чем у озонатора [4]. Все элементы сложной конструкции озонатора охлаждались проточной водой, тем не менее электроды плазмотрона сильно перегревались. Использование в дуговом разряде аргона, а не кислорода, было вынужденной мерой, направленной на защиту электродов от выгорания.

Высокая концентрация — 2 об. % и выход озона 0,4 кг/(кВт·ч) были получены в кислороде в трубчатых озонаторах скользящего разряда [6, 7] при низких температурах [7].

На основе разрядных камер объемного тлеющего разряда повышенного давления газа (атмосферного и выше), разработанных ранее специально для быстроточных CO₂-лазеров [8], в работах [9, 10] был создан технологический озонатор для получения озона в воздухе в целях очистки атмосферы от вредных примесей. При скользящей прокачке воздуха со скоростью 100—200 м/с между плоскопараллельными катодом и анодом через плазму коронного разряда при напряжении на промежутке 30 кВ генерируется озон с выходом 0,08 кг/(кВт·ч) и концентрацией $\leq 0,1$ %. При этом вложение мощности в разряд достигало 300 Вт/см³.

Распространенные сегодня источники радиоизлучения СВЧ-диапазона также привлекали к себе особое внимание как источники энергии для генераторов озона, во-первых, благодаря возможности бесконтактного ввода излучения в реакторы и резонансного усиления ионизирующих СВЧ-полей; во-вторых, благодаря возможности дистанционной передачи СВЧ-энергии.

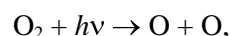
Разнообразные способы СВЧ-генерации озона с ориентацией на создание искусственной ионизованной области в стратосфере Земли в качестве "донора" озона для истощающегося озонового пояса рассмотрены в обзоре [11].

Следует подчеркнуть, что рекордно низкие энергозатраты (в 4—5 эВ) на молекулу озона были получены в экспериментах [12] и [13] с помощью СВЧ-полей сантиметрового диапазона в кислороде при пониженном давлении ≤ 30 мм рт. ст. Если в работе [12] эффект достигался благодаря незавершенному разряду на пороге СВЧ-пробоя за счет самосогласованной расстройки резонатора плазмой разряда (ее средняя концентрация была на три порядка меньше критического значения), что ис-

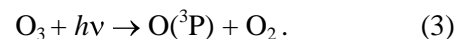
ключало перегрев газа, то высокая эффективность синтеза озона в [13] была получена благодаря формированию свободно локализованного разряда в последовательности мощных, но очень коротких СВЧ-импульсов наносекундной длительности, что также ограничивало разогрев среды. Теоретическая оценка [14] минимальной энергетической цены молекулы озона в рассмотренных в [12] условиях составила 6,8 эВ/мол.

Из сказанного следует, что наиболее эффективные озонаторы барьерного или коронного разряда основаны на диссоциации молекулярного кислорода электронным ударом. При оценке эффективности озонаторов следует учитывать не только потери электрической энергии источников на образование молекулы озона, но и технологические расходы энергии, связанные с вспомогательными системами: водяного охлаждения, охлаждения жидким азотом, прокачки воздуха и т. д.

При анализе работы озонаторов при атмосферном давлении, как правило, не учитывают роль УФ-излучения в образовании озона. Это связано с тем, что УФ-излучение — наиболее продуктивно для фотолиза молекулярного кислорода



и генерации озона согласно (1) принадлежит "вакуумной" области спектра, а именно, континууму Шумана-Рунге, в диапазоне длин волн $\lambda = 130$ —175 нм (переход $\text{B}^3\Sigma_u^- \rightarrow \text{X}^3\Sigma_g^-$), поскольку здесь в области 140—160 нм сечения фотопоглощения молекулярного кислорода превосходят сечения фотопоглощения озона почти на порядок величины [1, 15]. В диапазоне $\lambda = 175$ —200 нм к континууму примыкают полосы Шумана-Рунге с существенно меньшими сечениями фотопоглощения, причем в области $\lambda > 190$ нм генерация озона резко ослабевает, а в области полосы Хартли $200 < \lambda < 300$ нм сам озон уже активно поглощает УФ-излучение и разрушается согласно (2) в результате фотолиза, т. е.



Область "вакуумного" УФ-излучения (ВУФ) получила свое название из-за сильного поглощения излучения в плотной атмосфере, поэтому для его регистрации необходим вакуум. Условно граница ВУФ-области находится при $\lambda = 200$ нм. Ближе к этой границе находятся края пропускания оптических материалов, например кварца ($\lambda_q \approx 180$ нм) и лейкосапфира ($\lambda_q \approx 160$ нм).

Типичные УФ-озонаторы используют излучение ртутных ламп низкого давления, которые, если не брать область видимого излучения, генери-

руют две интенсивные линии ртути 184,9 нм (область полос Шумана-Рунге) и 253,7 нм (максимум полосы Хартли), причем интенсивности линий этих ламп находятся в отношении $I_{254} : I_{185} > 5$. Поглощение этого излучения в кислороде и озоне приводит к параллельным процессам рождения и гибели озона, причем превосходство поглощения озона над поглощением кислорода $\sigma_{254}(O_3) : \sigma_{185}(O_2) \sim 10^2$ приводит к установлению баланса между процессами при относительно низких уровнях концентрации озона $\sim 0,1$ мас. %.

Итак, разряды самого разного типа для получения высокого выхода озона должны отвечать часто противоречивым требованиям эффективной диссоциации кислорода при отсутствии разогрева газовой среды или требованиям быстрого переноса атомов кислорода из разряда в холодную область. ВУФ-излучение замечательно тем, что способно вызывать диссоциацию молекулярного кислорода, не нагревая газ, но его роль в атмосферных разрядах в силу названных причин остается малопонятной.

В предлагаемом эксперименте исследован синтез озона при воздействии открытого, не защищенного диэлектрической оболочкой плазменного факела и его УФ-излучения на кислород (воздух) в пространстве вокруг факела при атмосферном давлении. Данный способ генерации озона отличается простотой и доступностью используемых лабораторных средств и вероятно поэтому будет востребован для стерилизации сред в биологии и медицине.

Экспериментальная установка

Устройство СВЧ-горелки подробно описано в [16]. На рис. 1, а приведена схема экспериментальной установки. Энергетический узел горелки представляет собой волноводно-коаксиальный преобразователь СВЧ-волны H_{10} прямоугольного волновода 1 в ТЕМ-волну коаксиального волновода 2. Прямоугольный волновод возбуждается магнетроном непрерывной мощности, $P = 0,6$ кВт с частотой колебаний 2,45 ГГц. В границах волновода 1 экранная трубка коаксиального волновода 2 заменена кварцевой трубкой 3. Через эту радиопрозрачную трубку осуществляется связь преобразователя, причем она изолирует вакуумно-герметичную камеру реактора 4 от контакта с атмосферой. Внутренняя трубка коаксиального волновода диаметром 5 мм заканчивается коническим соплом с отверстием диаметром 1,5 мм, через которое истекает газоплазменная струя. В конструкции горелки, описанной впервые в [17], сопло изготовлялось из тугоплавкого металла, а внешняя трубка коаксиальной линии охлаждалась водой. В действительности эти меры оказались лишними, поскольку факел СВЧ-разряда, направленный вверх, оторван от сопла газовой струей, и сопло совсем не нагревается, что подтверждается отсутствием как эрозии самого сопла, так и спектральных линий материала сопла в эмиссионном спектре факела. Кварцевое окно 5 предназначено для оптических измерений и фотографирования факела.

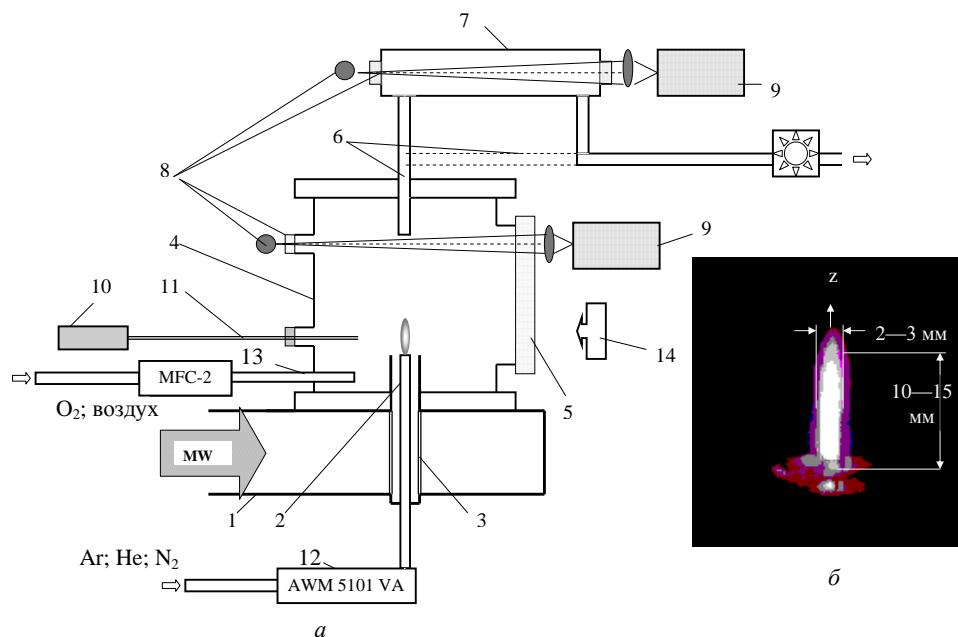


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — волноводно-коаксиальный преобразователь волн; 2 — медная трубка — центральный проводник коаксиального волновода;
- 3 — кварцевая трубка в разрыве экрана коаксиального волновода; 4 — камера СВЧ-горелки; 5 — кварцевое окно; 6 — выпускной патрубков с непосредственным выходом на вентиляцию (пунктир) или через измерительную кювету; 7 — измерительная кювета; 8 — ртутная лампа + кварцевое окно кюветы; 9 — монохроматор МУМ-1 с регистрирующей CCD-системой;
- 10 — мини-спектрометр FSD-8; 11 — волоконный световод; 12 — система подачи газов в горелку с измерителем расхода газа AWM 5101VA; 13 — система подачи кислорода (воздуха) в камеру с контроллером; 14 — цифровой фотоаппарат

Исследование переноса энергии в восходящем потоке факела проводили с помощью термопарного цифрового термометра MS 6500 и калориметра (на рис. 1 они не показаны). Спай термопары в виде шарика имеет диаметр 1,3 мм и может перемещаться вблизи яркой границы факела, не касаясь ее. Прикосновение термопары к плазме факела приводит к образованию дуги и срыву разряда. Калориметр выполнен в виде тонкостенного медного сосуда диаметром 4 см, наполненного водой, с погруженным в воду термометром. Калориметр размещается над светящимся факелом также без соприкосновения с плазмой.

Оптические измерения концентрации озона в самой камере 4 или в кювете 7 с отходящим из реактора потоком проводили известным методом по поглощению излучения в спектральной линии 253,7 нм ртутной лампы 8 (в максимуме полосы Хартли) с помощью приемника излучения 9. В качестве приемника использовали монохроматор МУМ-1 с регистрирующей системой МОРС-1/3648/UV, оснащенной ПЗС-линейкой CCD TCD1301D фирмы Toshiba из 3648 элементов и 12-разрядным АЦП. Излучение ртутной лампы фокусировалось на входной щели монохроматора кварцевым конденсором. Панорамные спектры факела в диапазоне 300—1000 нм измеряли мини-спектрометром FSD-8 (10), разработанным в ИОФ РАН. Мини-спектрометр также оснащен ПЗС-линейкой и кварцевым волоконным световодом 11. Изображение факела снималось через различные фильтры цифровой фотокамерой "Olympus" 14. Спектральная граница чувствительности матрицы фотокамеры в инфракрасной области (ИК) выше 950 нм, что было протестировано с помощью фотосъемки ИК-источника излучения от стандартного пульта дистанционного управления с предварительно измеренным спектром его излучения (810—950 нм).

Равновесное давление газа в камере реактора 4 при работе горелки устанавливается либо за счет естественного баланса между притоком и расходом газа вследствие его вытеснения в трубопровод через выпуск 6 непосредственно в систему вентиляции, либо через измерительную кювету 7. Объем камеры 8,3 л. Расход аргона через сопло измеряется расходомером Honeywell типа AWM 5101VA с линейной характеристикой в диапазоне 1—5 ст. л./мин. Кислород или воздух поступают в камеру реактора в область факела по трубке 13 через контроллер расхода MFC-021V.

Эксперименты по генерации озона

Параметры плазмы в СВЧ-факеле при протоке аргона были косвенно оценены еще в работе [16]. Газовая температура T_g в плазме факела определе-

на [18] на основе предпосылки о том, что продукты пиролиза различных химических соединений, добавляемых в факел, могут служить маркерами температуры их образования. В качестве температурной шкалы была использована известная зависимость равновесного состава системы C–H от температуры, полученная при крекинге метана CH_4 [19]. Определенная таким способом температура T_g составила от 3000 до 3500 К. Измерения электронной температуры плазмы разряда T_e проводили в чистом аргоне по отношению интенсивностей двух спектральных линий (487,93 и 366,96 нм) [20]. Температура электронов составила около 1,5 эВ. Нужно иметь в виду, что определение температуры электронов указанным методом не всегда является достаточно точным.

Изображение факела, представленное на рис. 1, б и снятое цифровой камерой без фильтра, представлено в 16-цветном формате, чтобы лучше показать неоднородность свечения факела. Пятна под факелом — блики на торце коаксиальной горелки. Сравнение изображений, полученных при съемке через ИК- и УФ-фильтры, указывает на то, что ИК-портрет факела больше его видимого и ультрафиолетового изображений.

Калориметрия переноса энергии в восходящем потоке факела (дно сосуда калориметра выше края видимой части факела на ~ 1 см) показала, что в тепловой поток переходит незначительная часть СВЧ-мощности, питающей разряд, — не более 2—3 %. Измерения распределения температуры в потоке над факелом при перемещении по вертикали, выполненные с помощью термометра MS 6500 (рис. 2), показывают, что температура газа над факелом при приближении к нему линейно растет, но остается ниже 70 °С, а при контакте с периферийной плазмой факела — резко растет. Введение в факел диэлектрических предметов не мешает его "горению". При этом бумага обугливается в нижней части факела. Воспламенение головки обычной спички при $T = 180$ °С происходит в нижней половине светящегося факела. Сказанное говорит о том, что зона высокой температуры T_g [18] находится вблизи сопла горелки. Достаточно низкая температура газа в светящейся верхней части плазменного факела, очевидно возбуждаемой свободными электронами, по нашему предположению может быть источником атомарного кислорода и, следовательно, источником озона.

Измерения средней концентрации (парциального давления) озона в камере реактора проводились по ослаблению интенсивности линии 253,7 нм ртутной лампы при прохождении светом пути в реакторе $L = 32$ см. В качестве рабочих газов СВЧ-факела использовались аргон, гелий, азот. Скорости расхода газов в факеле варьировались в преде-

лах 3—5 ст. л./мин. Расход кислорода или воздуха, поступающих в зону факела, не превышал 1,5—2 ст. л./мин. Стабильное "горение" факела наблюдалось на гелии и аргоне. Горение факела на азоте было "пляшущим". Режимы стабильного горения в аргоне и гелии можно условно разделить на ламинарный и турбулентный.

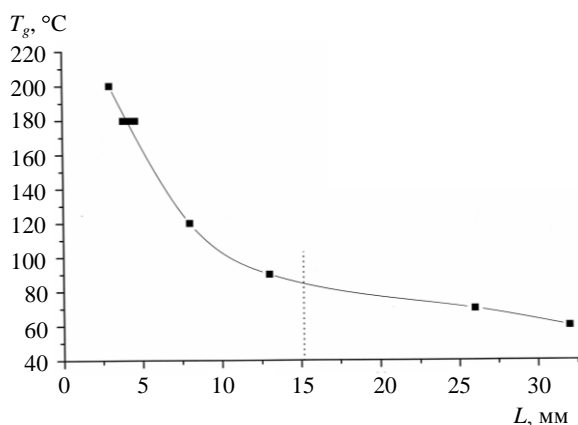


Рис. 2. Распределение температуры газа по высоте факела по данным термпарного термометра:
 —■— координата возгорания спички 180 °С;
 - - - - - верхняя граница видимой части факела

Первый из режимов характеризуется тихим горением и стабильной формой факела, второй — шипением и дрожанием факела. Для ламинарного горения заданной скорости расхода газа в горелке соответствует определенная СВЧ-мощность, выше которой разряд переходит в турбулентный режим. Оказалось, что наилучшие результаты по генерации озона достигаются в ламинарном режиме горения при относительно небольшой СВЧ-мощности. Накопление озона в камере уменьшалось при включении принудительной вытяжной вентиляции камеры. Измерения средней концентрации озона проводили как в самой камере реактора при естественном вытеснении из нее смеси газов собственным избыточным давлением, так и в измерительной кювете, включенной в выхлопной тракт установки. Температура газа в объеме камеры и над факелом, где проводили измерения, близка к комнатной, а давление близко к атмосферному. Концентрация озона определялась по закону Бугера-Ламберта [1]

$$[O_3] = 2,3 \cdot \lg(I_0 / I) \cdot \frac{1}{\sigma_\lambda L} \cdot \frac{T}{273} = A \cdot 10^{15} \cdot \lg(I/I_0), \quad (4)$$

где I_0 — начальная интенсивность света;
 I — интенсивность прошедшего света через контейнер с озоном при измерении;
 σ_λ — сечение поглощения молекулы озона для длины волны ртутной линии $\lambda = 253,7$ нм ($\sigma_\lambda = 1,155 \cdot 10^{-17}$ см²);
 $T = 293$ К — температура газа.

Коэффициент $A = 6,68$ для $L = 32$ см в камере реактора и $A = 10,7$ — для $L = 20$ см в кювете.

На рис. 3, а представлены зависимости интенсивности света $\lambda_{253,7}$, проходящего через реактор, от времени по мере накопления озона в кислороде и воздухе, измеренные для разных плазмообразующих газов: аргона и гелия (при расходе 4,6 ст. л./мин для Ar и 14,5 ст.л./мин — для He). Расходы кислорода и воздуха были близки — 1,7 и 1,3 ст. л./мин, соответственно. Пересчет этих зависимостей на зависимости средней концентрации озона согласно (4) представлен на рис. 3, б, куда добавлена еще зависимость (3) для азота в качестве плазмообразующего газа.

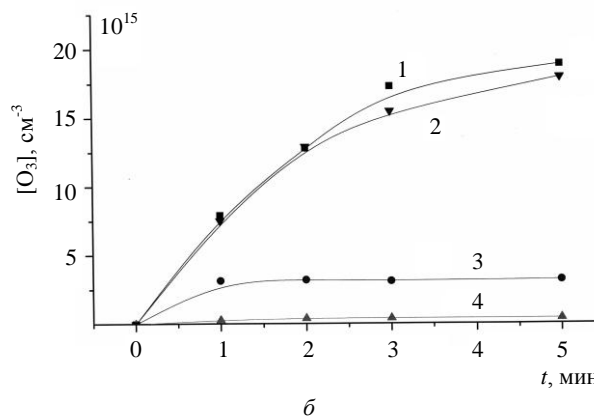
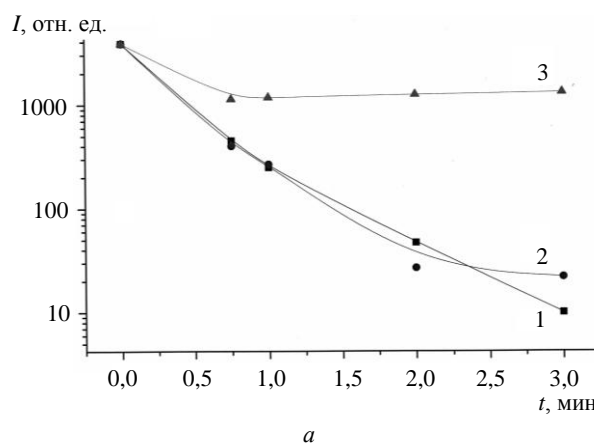


Рис. 3. Оптические измерения роста концентрации озона в камере установки в сочетаниях кислорода (воздуха) с плазмой аргона (гелия) в зависимости от времени. Расход газов указан в литрах/мин стандартной атмосферы, [ст. л./мин]:

1 — He (14)+O₂ (1,7); 2 — Ar (4,6)+O₂ (1,7);
 3 — Ar (4,6)+воздух (1,3);

а — изменение с ростом концентрации озона интенсивности света ртутной линии лампы $\lambda_{253,7}$ при прохождении через камеру;
 б — зависимость концентрации озона от времени по данным измерений рис. 3, а

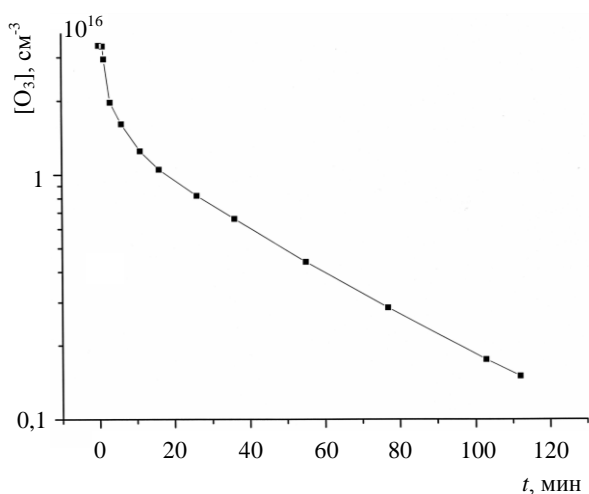
Видно, что генерация озона в воздухе пропорциональна содержанию в нем кислорода. Режим насыщения концентрации озона наступает в воздухе раньше, чем в аргоне. В азотной плазме озон практически не образуется. Эффективности генерации озона в гелии и аргоне близки. Насыщение концентрации озона в кислороде и воздухе происходит за время, соответствующее 2—3-кратному обмену газовой смеси в камере. Дальнейшего накопления озона в камере не происходит из-за проточности смеси и, возможно, из-за частичного распада озона под влиянием излучения факела и возбужденных молекул синглетного кислорода. Максимальная концентрация озона в камере соответствует высокому уровню содержания $\sim 0,1\%$, или 10^3 ppm. Генерация синглетного кислорода при переходе в турбулентный режим горения разряда существенно возросла, что наблюдалось по испусканию в области спектра $\lambda = 634$ нм [21]. При этом концентрация озона в камере также заметно уменьшалась.

Распад озона в смеси с кислородом и аргоном при атмосферном давлении в закрытой камере после выхода концентрации озона в режим насыщения показан на рис. 4, а, б в разных масштабах времени. Выделяются три характерных масштаба, которые условно назовем минутный, часовой и суточный. Минутный масштаб распада связан, по видимому, с присутствием возбужденных молекул, например синглетного кислорода, которые участвуют в разрушении озона и вскоре погибают после отключения факела. Следующая, часовая стадия, имеющая экспоненциальный характер распада озона с постоянной $k_{\text{exp}} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$, носит вероятнее всего гомогенный характер, так как гетерогенный механизм гибели озона на стен-

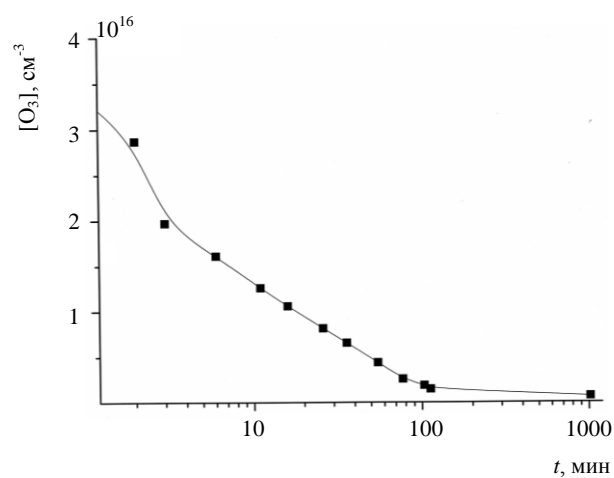
ках камеры при атмосферном давлении и комнатной температуре практически исключен [1, 22]. Третья, наиболее продолжительная, стадия, длящаяся сутки, не противоречит общим представлениям о продолжительности жизни озона. На этой стадии озон, видимо, уже находится в спокойном состоянии.

В виду того, что аргон-кислородная смесь с озоном вытесняется из объема реактора поступающей смесью газов, была измерена концентрация озона в потоке через кювету, присоединенную к выходному патрубку реактора. Результаты измерений представлены на рис. 5 при разных значениях расхода аргона при заданном расходе кислорода (см. рис. 5, а) и наоборот — при разных значениях расхода кислорода и заданном расходе аргона (см. рис. 5, б).

Увеличение расхода аргона и кислорода способствует росту концентрации озона в потоке, проходящем через кювету. Однако увеличение расхода плазмообразующего газа (аргона) активнее влияет на генерацию озона, чем увеличение расхода кислорода. Обращают на себя внимание два обстоятельства: первое — концентрация озона в кювете превышает среднюю концентрацию, измеренную в направлении диаметра камеры в верхней ее части. Это можно объяснить тем, что озон выносится вместе с потоком аргона вверх и захватывается выпускным патрубком; второе — концентрация озона в кювете продолжает расти даже после наступления режима насыщения концентрации внутри камеры реактора. Измерить концентрацию озона в кювете при выходе в насыщение не удалось из-за недостаточной интенсивности линии $\lambda_{253,7}$ ртутной лампы и ограничения чувствительности регистрирующей CCD-линейки.



а



б

Рис. 4. Деструкция озона в изолированной камере СВЧ-горелки после выключения генерации озона:

а — измерения в течение 2 ч; б — в течение 20 ч

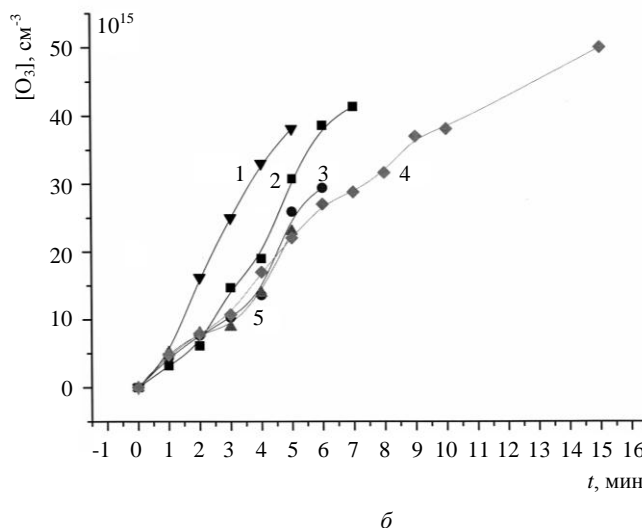
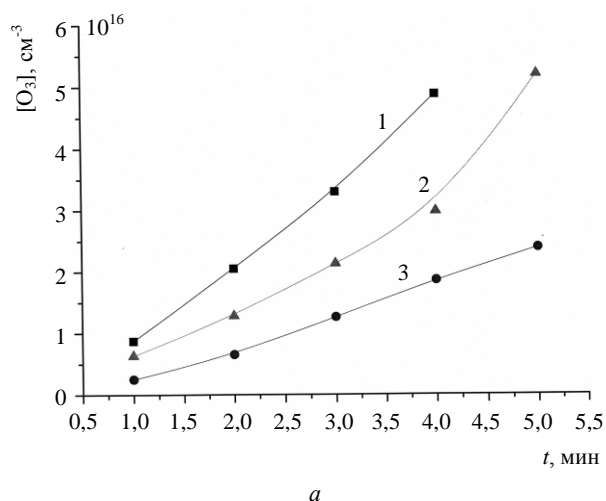


Рис. 5. Измерения концентрации озона при протоке смеси через измерительную кювету при варьировании расходов плазмообразующего аргона, кислорода и воздуха в [ст. л./мин]:

a — расход кислорода — 5; расход аргона: 1 — 5,8; 2 — 4,6; 3 — 2,7;
 б — расход аргона — 4,6; расход кислорода: 1 — 5,3; 2 — 4,0; 3 — 2,6; 4 — 1,6; 5 — 0,8

Оценка производительности СВЧ-факела по озону показывает, что при измеренных концентрациях $[O_3] = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и расходах смеси порядка 10 ст. л./мин в час производится $3 \cdot 10^{22}$ молекул, или 2,3 г при номинальной мощности СВЧ-источника 0,6 кВт, что соответствует выходу 3,8 г/(кВт·ч). В действительности оптимальный режим работы горелки по генерации озона не требовал максимальной СВЧ-мощности, поскольку ее увеличение приводило к нестабильному режиму горения факела, с образованием синглетного кислорода, разрушающего озон. В данном эксперименте отсутствовала возможность контроля вкладываемой в разряд мощности. Кроме того, не была измерена максимальная концентрация озона из-за указанных выше ограничений в средствах оптических измерений. Сказанное означает, что выход озона в принятых единицах г/(кВт·ч) может быть в разы выше, и, следовательно, рассматриваемый СВЧ-источник озона может конкурировать с дуговым озонатором [5].

Выводы

Предложенный метод генерации озона в газовой фазе при использовании СВЧ-горелки имеет такие достоинства, как простота конструкции и надежность (нет бьющихся, труднозаменяемых частей), а в качестве источника разряда используются доступные магнетроны бытовых СВЧ-печей с компактными источниками питания с постоянным напряжением 4 кВ.

В качестве источника кислорода может использоваться воздух от маломощного компрессора. Естественно, при использовании воздуха выход озона

будет меньше. Неизбежным компонентом, несколько повышающим стоимость озона, остается плазмообразующий газ — аргон.

Количество производимого СВЧ-горелкой озона для медицинской практики достаточно велико. Озон уничтожает все известные микроорганизмы: бактерии, вирусы, простейшие и их споры, цисты и т. д., при этом озон сильнее хлора и действует на порядок быстрее [23]. Вирус полиомиелита погибает при концентрации озона 0,45 мг/л через 2 мин, а от хлора — только за 3 ч при 1 мг/л. Генератор озона производительностью 10—20 г/ч позволяет провести санитарную обработку палат за 5—10 мин, причем намного эффективнее ультрафиолетовой лампы, так как озон заполняет все пространство помещения, проникая в поры и щели. Благодаря способности разлагаться озон в сочетании с аргоном не вредит экологии.

Авторы выражают благодарность В. П. Бармину и А. П. Большакову за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках проекта № 06-08-00542а при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 480 с.
2. Филиппов Ю. В., Вобликова В. А., Пантелеев В. И. Электросинтез озона. — М.: Наука, 1987.
3. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: Наука, 1989.
4. www.astex.mksinst.com

5. Скадченко О. Е., Вендилло В. П., Филиппов Ю. В.// Вестник Моск. ун-та. Сер. Химия. 1972. Т. 13. № 5. С. 594.
6. Masuda S., Akutsu K., Curoda M. et al.// Proc. IEEE/IAS, 1985. Annual Conf., Toronto, Canada. P. 1353.
7. Masuda S., Koisumi S., Inone J. et al.// Ibid. 1986. Annual Conf., Denuer, USA. P. 1235.
8. Голубев В. С., Паукин С. В. Тлеющий разряд повышенного давления. — М.: Наука, 1990. — 335 с.
9. Акишев Ю. С., Напартович А. П., Трушкин Н. И. Озонаторостроение и применение озона в народном хозяйстве: Информационные материалы. — М.: Информационный центр "Озон", 1994. С. 45.
10. Akishev Yu. S., Levkin V. V., Napartovich A. P. et al.// Proc. of ICPIG-XX, Pisa, Italy, 1991. V. 4. P. 901.
11. Гуревич А. В., Литвак А. Г., Вихарев А. Л., Иванов О. А., Борисов Н. Д., Сергейчев К. Ф.// Успехи физических наук, 2000. Т. 170. № 11. С. 1181—1202.
12. Lukina N. A., Sergeichev K. F., Sychov I. A.// Proc. 21 Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. — Bochum, Germany, 1993. V. 1. P. 83—84.
13. Ахмеджанов Р. А., Вихарев А. Л., Горбачев А. М., Иванов О. А., Колыско А. Л.// ЖТФ. 1997. Т. 67. № 3. С. 9.
14. Gurevich A. V., Borisov N. D., Lukina N. A., Sergeichev K. F. et al.// Physics Letters A. 1995. № 201. P. 234—238.
15. Eliasson B., Kogelshatz U.// Basic Date Modelling of Electrical Discharges in Gases: Oxygen. June. 1986, BBC Brown Boveri, Konzernfor, KLR 86-110.
16. Власов Д. В., Сергейчев К. Ф., Сычев И. А.// Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 5. С. 484—492.
17. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. — М.: Энергия, 1068. С.140.
18. Антонов А. В., Власов Д. В., Лукина Н. А., Сергейчев К. Ф.// Прикладная физика. 2006. № 6. С. 121—126.
19. Использование плазмы в химических процессах/ Под ред. Р. Ф. Баддура, Р. С. Тимминса— М.: Мир, 1970. — 256 с.
20. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. — М., 2001. — 894 с.
21. Рэнби Б., Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. — М.: Мир, 1978. — 676 с.
22. Ткаченко С. Н. Гомогенное и гетерогенное разложение озона: Дисс... на соискание степени д-ра хим. наук/ МГУ. — М., 2004.
23. Интернет: www.waterline.ru/goods/ozon/ozon.php

Статья поступила в редакцию 27 августа 2007 г.

Ozone formation in oxygen and air under action of the microwave torch plasma at atmospheric pressure

N. A. Lukina, K. F. Sergeichev

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

The ozone formation experiments in oxygen and air under action of microwave plasma torch are presented. Data of the ozone formation in the flame of argon, helium and nitrogen torch are obtained. The ozone efficiency formation is evaluated. The simple mean of ozone formation may be applied with profit to the medical practice for sterilization of instruments and environment.

УДК 533.9

Особенности формирования переходного слоя на границе стеклокерамики и Ni—Cr-сплава при спекании в поле мощного сверхвысокочастотного излучения

А. А. Раваев, Е. Б. Алфеев, И. И. Есаков, Е. Г. Пан, А. И. Хоменко
ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Россия

А. Г. Богданов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия

В. А. Иванов

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Рассмотрены особенности формирования переходной зоны в структурах типа металл—керамика на примере лейцитовой стеклокерамики и Ni—Cr (Co—Cr)-сплавов при спекании в поле мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения сантиметрового диапазона длин волн. Результаты микроструктурного и рентгеноспектрального анализа указывают на явные различия в механизмах формирования этой области у образцов, синтезированных в СВЧ-камере, и у образцов, получаемых по традиционной технологии в