

УДК 537.5

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ СТРУЕЙ СВЧ-ПЛАЗМЫ АРГОНА В АТМОСФЕРЕ ВОДЯНОГО ПАРА

© 2024 г. К. Ф. Сергейчев*, Н. А. Лукина

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

*e-mail: k-sergeichev@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023 г.

После доработки 14.02.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2024 г.

Предложен способ активации воды плазмой безэлектродного факельного разряда в СВЧ электромагнитном поле в аргоне в среде водяного пара при атмосферном давлении для получения в дистиллированной воде чистого раствора пероксида водорода H_2O_2 без примесей. Показано, что основным механизмом образования радикалов атомарного водорода $H^\bullet$ и гидроксила $HO^\bullet$ при распаде воды является фотолиз под воздействием эксимерного вакуумного ультрафиолетового излучения аргоновой плазмы факела. Дополнительным источником радикалов в жидкой воде могут быть гидратированные электроны при соприкосновении плазменного факела с поверхностью воды. Плазменные технологии сегодня широко используются для получения активированной воды с содержанием перекиси водорода, для решения задач экологии, повышения урожайности в сельском хозяйстве и для применения в медицине.

Ключевые слова: СВЧ-разряд, аргон, плазма, факел, дистиллированная вода, водяной пар, эксимер, активные формы кислорода, пероксид водорода

DOI: 10.31857/S0367292124050109, **EDN:** PVZQSM

1. ВВЕДЕНИЕ

Физико-химические эксперименты с водой имеют глубокую историю, связанную с именами ученых XVIII в. Д. Пристли, А. Лавуазье и Г. Кавендиша, которые заложили основы химической науки и создали первые представления о газах, как о химических элементах и их соединениях [1]. Пристли принадлежит открытие кислорода, окиси и закиси азота, а также других газовых соединений. Он заложил новое направление исследований в биологии, приведшее впоследствии к открытию фотосинтеза, — им был обнаружен симбиоз мышей и растений в замкнутой экосистеме под стеклянным колпаком, где растения поглощали выдыхаемый мышами «испорченный воздух» (углекислый газ), а на свету эти растения выделяли в окружающее пространство кислород, необходимый для жизни животных. Лавуазье предложил стройную теорию окисления и горения, которая окончательно разрушила теорию флогистона. Кавендиш, используя точные для своего времени аналитические методы, выделил «горючий газ» — водород в чистом виде и определил его плотность, а также положил начало химии атмосферной плазмы, применив метод электрических искровых разрядов в смеси водорода и воздуха, с помощью которых получил воду и окислы азота. Им же впер-

вые были определен химический состав воды и атмосферного воздуха, за исключением 1%-ного (по объему) остатка воздуха, который не участвовал в химических реакциях. Этот остаток был идентифицирован как инертный газ — аргон лишь в конце XIX в. Д.У. Стреттом (Рэлеем) и У. Рамзаем.

Современные исследования воздействия плазмы на воду представлены широким обзором [2], охватывающим большинство распространенных способов электрофизической активации воды, где рассматриваются как прямой электролиз жидкости, так и разные виды воздействия на жидкость плазмы электрических разрядов в газах и воде. Эти исследования приобрели экологическую направленность, когда было установлено, что облучение воды потоками плазмы в открытой атмосфере изменяет химический состав воды и ее свойства благодаря образованию в ней химически активных форм кислорода и азота (АФКА), включая перекись водорода, супероксид, гидроксильные радикалы, оксиды азота, и пероксинитрит. Обработка воды плазмой сегодня уже находит применение в биологической очистке сточных вод [3–4], в санитарии, производстве продуктов питания [5], в растениеводстве [6, 7] и в медицине [8–9]. В обзоре [2] безэлектродные электромагнитные сверхвысокочастотные (СВЧ) раз-

ряды [10, 11], способные в изолированной от атмосферы среде создавать чистую плазму, не рассматривались.

Для получения чистых продуктов плазменной активации воды (ПАВ) целесообразно использовать струйные СВЧ-плазмотроны непрерывного действия с емкостной связью, которые впервые нами были использованы в технологии плазменного синтеза алмаза при атмосферном давлении [11]. Благодаря высокой скорости истечения несущего газа (аргон, гелий) плазменная струя (факел) отделяется от сопла СВЧ-плазмотрона слоем нейтрального газа, еще не затронутого ионизацией. Нейтральный слой формирует емкость, через которую реализуется связь между соплом и плазмой факела. При этом вокруг факела формируется самосогласованное поле поверхностной СВЧ-волны [12, 13], генерирующей чистую плазму в вытекающей струе инертного газа. Так как сопло не контактирует с плазмой, оно не подвергается эрозии и не загрязняет плазму. Струя плазмы аргона с температурой сварочной дуги (ионная температура аргона: 6000–7000 К) оказывает воздействие на воду, производя химические реакции на границе раздела плазмы и воды, а также в среде окружающего пара. При этом активация воды идет не только на контакте плазмы с водой и паром, но и под влиянием эксимерного излучения плазмы аргона. Таким способом можно обрабатывать как электропроводящие водные электролиты, так и не проводящую электрический ток дистиллированную воду.

Представленная работа направлена на изучение воздействия на воду струи СВЧ-плазмы аргона атмосферного давления для получения чистых растворов только с активными формами кислорода (АФК), включая пероксид водорода H_2O_2 биологического качества, не содержащих примесей. Работа плазмотрона проводится в контролируемой газовой среде — в камере, изолированной от окружающего воздуха в защитной атмосфере водяного пара. Для стабилизации «горения» СВЧ-факела ранее, например, в [14, 15] мы использовали азот, так как факел в собственной атмосфере аргона в закрытом сосуде в отсутствие завесы из молекулярного газа легко переходит в режим дугового СВЧ-разряда на срезе коаксиального плазмотрона, что приводит к его разрушению.

С целью исключения из продуктов плазменной активации воды (ПАВ) окислов азота, для завесы вокруг факела в качестве альтернативы азоту был применен перегретый водяной пар, и, таким образом, процесс активации воды и пара ограничивался только инертным аргоном. Использование для стабилизации СВЧ-факела газов из числа элементов

в составе воды (кислорода или водорода) оказалось в данном случае проблемным из-за их высокой химической активности. На новый способ стабилизации горения факельного СВЧ-разряда потоком водяного пара получен патент [16].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Установка СВЧ бесконтактной плазменной активации воды (водных растворов) (рис. 1) в результате замены азотной завесы плазменного факела для стабилизации работы плазмотрона потоком водяного пара от парогенератора дала возможность проводить активацию воды плазмой аргона без участия азота. В качестве источника непрерывной генерации СВЧ-колебаний был использован «Магнетрон Вд-3ф», АгроЭкоТех [16] — мощностью 1200 Вт с частотой колебаний 2.45 ГГц. Магнетрон в блоке генератора 1 возбуждает в волноводном тракте 2 прямоугольного сечения 45×90 мм² волну типа TE_{10} . Тракт содержит стандартные элементы (не показаны): циркулятор типа ВФВВ2-42 для защиты магнетрона от отраженной мощности в отсутствие газового СВЧ-разряда и устройство согласования генератора с нагрузкой — плазменным факелом. Коаксиальный волновод плазмотрона 3 встроен в прямоугольный волновод перпендикулярно его широкой стенке, за ним в волноводе на расстоянии $\sim \lambda_v/4$ от оси плазмотрона ($\lambda_v = 16.7$ см — длина волны TE_{10}) расположен подвижный короткозамыкающий поршень для настройки электрического поля стоячей волны в волноводе 2 на максимальное значение (пучность) на центральном проводнике плазмотрона 3. Плазмотрон имеет газораспределительный узел 4 для подачи в него аргона и потока пара. Аргон из баллона сжатого газа 5 поступает во внутреннюю трубку-эжектор 6 с наружным диаметром 6 мм. Трубка заканчивается коническим соплом с отверстием 1,5 мм. Пар из парогенератора 7 поступает по горячему трубопроводу с теплоизоляцией через узел 4 в пространство между эжектором и кварцевой трубкой-изолятором 8 диаметром 22 мм. Радиопрозрачная трубка 8 отделяет внутреннее пространство плазмотрона от атмосферы в прямоугольном волноводе 2, благодаря уплотнению со стенками волновода прокладками из витона. Корпус коаксиальной части плазмотрона через скользящее уплотнение в крышке входит в герметичную камеру реактора 9 с внутренними размерами: диаметр 22 см, высота 22 см. Камера изготовлена из нержавеющей стали с двойными стенками, образующими контур водяного охлаждения камеры 10. Камера внутри наполняется дистиллированной водой 11. При зажига-

нии разряда в струе аргона формируется плазменный факел 12, окруженный паровой завесой 13. Давление аргона и пара в камере реактора поддерживали выше атмосферного, $p \geq 1$ атм. Расходы аргона варьировали в пределах 4–5 ст.л./мин. Расход пара при стартовом разогреве системы поддерживали на уровне 90 ст.л./мин, а в режиме обработки воды снижали до 11 ст.л./мин.

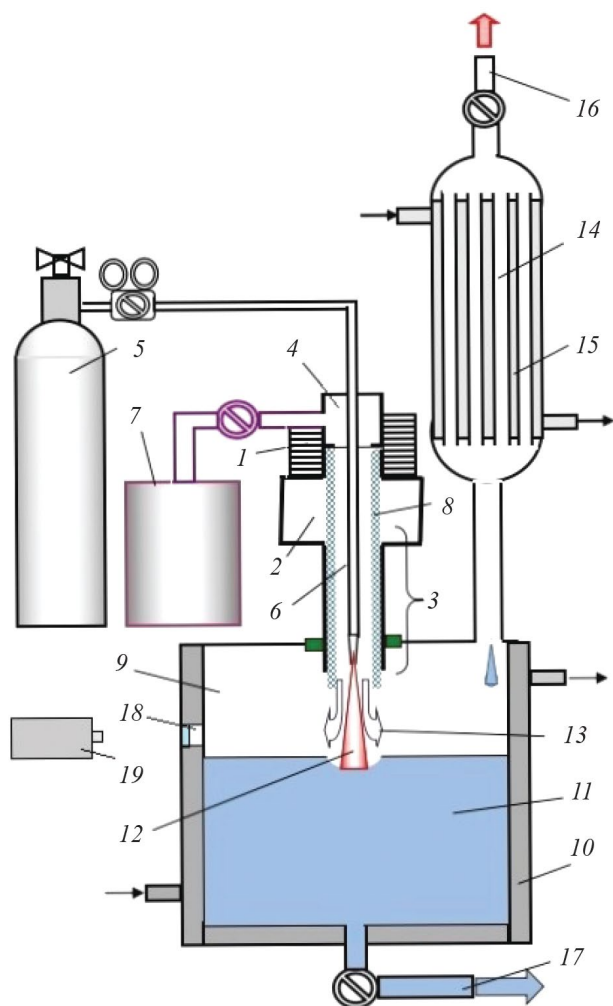


Рис. 1. Схема установки СВЧ плазменной обработки воды.

1 – магнетрон, 2 – волновод сечением 45×90 мм²; 3 – коаксиальная часть плазмотрона; 4 – газораспределительная камера; 5 – баллон со сжатым аргоном; 6 – трубка-эжектор аргона с соплом; 7 – бак генератора пара с индукционным нагревом и паропроводом; 8 – кварцевая трубка-изолятор; 9 – камера реактора; 10 – контур внешнего водяного охлаждения камеры; 11 – дистиллированная вода; 12 – плазменный факел; 13 – паровая завеса факела; 14 – полые трубки кожухотрубного холодильника; 15 – водяное охлаждение трубок; 16 – выпуск аргона в вытяжную вентиляцию; 17 – выпуск активированной воды; 18 – кварцевое окно; 19 – спектрометр.

Струя аргона на расстоянии от сопла до воды $\Delta < 3$ см выдавливает на поверхности воды ямку. При этом отработавшие аргон и часть водяного пара вытесняются из объема камеры через патрубок в кожухотрубный холодильник 14, присоединенный к крышке камеры. Полые трубки холодильника 15 охлаждаются водой, протекающей внутри кожуха. Пар из объема камеры конденсируется в трубках холодильника и конденсат стекает обратно в камеру 9. Воду после окончания активации плазмой сливали через дренажный патрубок 17. Кварцевое смотровое окно в камере 18 использовали для проведения спектральных измерений факела спектрометром 19. Бак парогенератора 7 из нержавеющей стали, наполняли дистиллированной водой и нагревали индукционной электроплитой iPlate YZ-T18 с сенсорным управлением. Стартовый разогрев воды до кипения проводили при мощности парогенератора $P = 1.5$ кВт, затем мощность нагрева переключали на рабочее значение 0.3 кВт и выдерживали около 20 минут перед зажиганием плазмотрона. Объемный расход пара при атмосферном давлении измеряли по количеству воды, конденсированной в единицу времени в холодильнике на выходе из плазмотрона без СВЧ-разряда. Расход пара дистиллированной воды 11 л/мин (при мощности нагрева 0.3 кВт) был принят оптимальным для стабилизации работы факела.

Напряженность СВЧ-поля вблизи сопла составляла около 1 кВ/см, но была недостаточной для зажигания самостоятельного разряда в паровой среде, поэтому вблизи сопла создавали искру импульсным искровым источником с пиковым напряжением около 10 кВ (устройство искрового поджига не показано).

Измерения температуры воды и парогазовой атмосферы проводили цифровым термометром Mastech MS6500 с термопарным датчиком К-типа (диапазон измеряемых температур от -50°C до 750°C).

2.1. Материалы: дистиллированная вода, аргон

Предварительную очистку водопроводной воды проводили через мембранный проточный фильтр, после которого электропроводность воды понижалась с 200–300 мкСм/см до 5–6 мкСм/см, затем перегоняли воду в дистилляторе с рабочим значением электропроводности на выходе не более 1 мкСм/см, т. е., вода, поступающая в реактор с паром, имеет качество двойной перегонки. Использовали аргон высокой чистоты, его состав показан в табл. 1.

Таблица 1

Газ	%
Аргон ВЧ*	> 99,998
Кислород	< 0,9992
Азот	< 0,001
Водяной пар	< 0,0003
Двуокись углерода	< 0,00002
Метан	< 0,0001
Водород	< 0,0002

*ТУ6-21-12-94

Примеси атмосферных газов к аргону: кислород, водяной пар, водород — практически не влияли на баланс химических реакций с водой и паром, а примесь двуокиси углерода минимальна. Только примесь азота в этом случае могла оказаться более существенной.

2.2. Методы измерений

Для характеристики плазмы разряда методом оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) в экспериментах использовали спектральные приборы в диапазоне длин волн 200–1000 нм с различным разрешением: спектрометр FSD-8 16 невысокого разрешения (около 10 нм) служил для спектрального контроля режимов «горения» плазменного факела, спектрометры AvaSpec-2048 (УФ и синяя область) и AvaSpec-3648 (красная область спектра) с разрешением около 0.3 нм использовали для измерений спектров. Изображение плазменного факела проецировали на входной торец кварцевого световода, другой конец которого установлен перед входной щелью спектрального прибора.

Вода при обработке нагревается плазмой СВЧ-факела в рабочей зоне в центре камеры, ее охлаждение идет на стенках камеры за счет теплопередачи. Вода также нагревается с поверхности паром, заполняющим верхнюю часть камеры реактора. Для определения температурных условий образования и сохранения активных форм кислорода (АФК), в частности H_2O_2 , проводились измерения температурного поля в объеме воды и над водой в парогазовой атмосфере цифровым термометром Mastech MS6500.

Концентрацию пероксида водорода в воде, активированной плазмой, измеряли методом колориметрии цифровым тестером-фотометром Water-i.d. PoolLab 1.0 в диапазоне 0,0–2,9 мг/л с таблетками стандартного реагента PoolLab Peroxide LR. При превышении предела измерений ПАВ предварительно разводили в дистиллированной воде в опре-

деленном соотношении. Для определения ошибок измерений проводили не менее трех независимых измерений. Пробы раствора на содержание пероксида водорода брали в процессе обработки воды откачкой шприцом через стеклянную трубку с координатами точки отбора $r = 80$ мм на различных глубинах погружения в воду h . Измерения концентрации пероксида водорода в пробах проводили при температуре 25°C через час после взятия проб.

Параметры воды, обработанной плазмой: электропроводность (σ), водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал измеряли тестерами качества воды TDS Meter 3, высокоточным анализатором жидкостей PH-200 и ОВП-метром ORP-200.

2.3. Плазменный факел

Свободный плазменный факел в струе аргона, истекающей из сопла коаксиального эжектора, формируется под действием самосогласованного СВЧ-поля поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), поддерживающей плазму [12, 13]. Факел оторван от сопла благодаря высокой скорости истечения газа 30–50 м/с, которая превышает скорость движения фронта ионизации по струе аргона навстречу соплу. Факел не имеет контакта с медным соплом, которое не нагревается. В спектре излучения плазмы отсутствуют линии паров меди, что позволяет считать факельный СВЧ-разряд безэлектродным, а плазму и обрабатываемую ею воду — не имеющими примесей. Яркая сердцевина плазменной струи имеет диаметр 0.2–0.3 см, длину ≤ 3 см. Температура газа T_r , измеренная в [11] в аргон-водородной плазме факела достигала значений $(4 \div 5) \times 10^3$ К, а электронная температура $T_e \leq 1,5$ эВ. Изменяя уровень воды в камере реактора, можно изменять расстояние от факела до воды вплоть до касания им поверхности воды и погружения в воду до половины его светящейся части.

Чистые растворы ПАВ с АФК можно получать без посторонних примесей, которые присутствуют в электродуговых и иных типах разрядов из-за эрозии электродов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Непрерывная мощность СВЧ-генератора 1200 ± 50 Вт была измерена калориметрическим методом с помощью согласованной нагрузки с проточной водой. В экспериментах СВЧ-мощность не варьировалась. Характеристики плазменного факела оценивали по величине измеренного уширения водо-

родной спектральной линии H_α и на основании расчетов по уравнению Саха. В продуктах плазменной активации при стабилизации факела паром образуются короткоживущие АФК и долгоживущий пероксид водорода, который измеряли фотометром Water-i.d. PoolLab 1.0. Пар с содержанием H_2O_2 , конденсируясь в холодильнике, стекал в камеру, а аргон уходил в вентиляцию, что позволило сохранить продукты активации воды без потерь.

3.1. Эмиссионные спектры плазмы СВЧ-факела при стабилизации паром

На рис. 2а,б показаны оптические эмиссионные спектры (ОЭС), регистрируемые спектрометрами AvaSpec-2048 (а) и AvaSpec-3648 (б). При этом плазма факела стабилизировалась сопутствующим потоком насыщенного водяного пара в отсутствие контакта с атмосферой. Изображение факела попадало полностью в телесный угол принимающего торца оптоволоконного световода, соединенного со спектрометрами, поэтому измеряемые спектры являются интегральными по объему факела и все определяемые по ним параметры плазмы следует рассматривать как усредненные.

Распад водяного пара приводит к образованию радикалов гидроксила ОН и атомов водорода. На спектре рис. 2а видны интенсивные полосы (в диапазоне длин волн 306–309 нм) принадлежащие электронно-колебательному спектру гидроксила ОН ($X^2\Pi-A^2\Sigma^+$, переход 0–0) и линии атомов водорода серии Бальмера и атомов кислорода. Линии

аргона на участке спектра (а) 200–690 нм отсутствуют. В красной части спектра (рис. 2а) зарегистрированы интенсивная линия 696.3 нм и линия 738.4 нм, принадлежащие аргону, а линия 715.6 нм – атомному кислороду. В спектре (рис. 2б) присутствуют преимущественно линии водорода, аргона и кислорода. Широкий интенсивный континуум в видимой части спектра на рис. 2а в диапазоне от 350 до 700 нм можно считать рекомбинанционным спектром плазмы с возможным наложением на него спектров флуоресценции водяного пара [17]. В красном спектре присутствуют интенсивные линии излучения аргона 750.4 и 811.5 нм. Полосы гидроксила ОН сливаются с полосами 2-й положительной системы азота N_2 в диапазоне длин волн 310.5–337.1 нм. Присутствие азота в системе может быть связано с наличием небольшой примеси азота в составе ВЧ-аргона. Спектры, представленные на рис. 2, отличаются от спектров плазмы при стабилизации СВЧ-разряда потоком азота [15] заметным увеличением интенсивности полос гидроксила и интенсивности линий водорода H_α (656 нм) и H_β (486 нм).

3.2. Параметры плазмы факела

Значение электронной концентрации плазмы в факеле n_e вычислили из штарковского уширения наиболее яркой спектральной линии водорода H_α на полувысоте ее интенсивности – $\Delta\lambda_{1/2} = 11 \text{ \AA}$ (рис. 2б) по формуле [19].

$$\Delta\lambda_{1/2} = 8,16 \times 10^{-19} \lambda_0^2 \sqrt[3]{n_e^2} \left(1 - \frac{0,7}{\sqrt[3]{N_D}}\right) (n_1^2 - n_2^2) \frac{\sqrt[3]{Z_p}}{Z_e}, \quad (1)$$

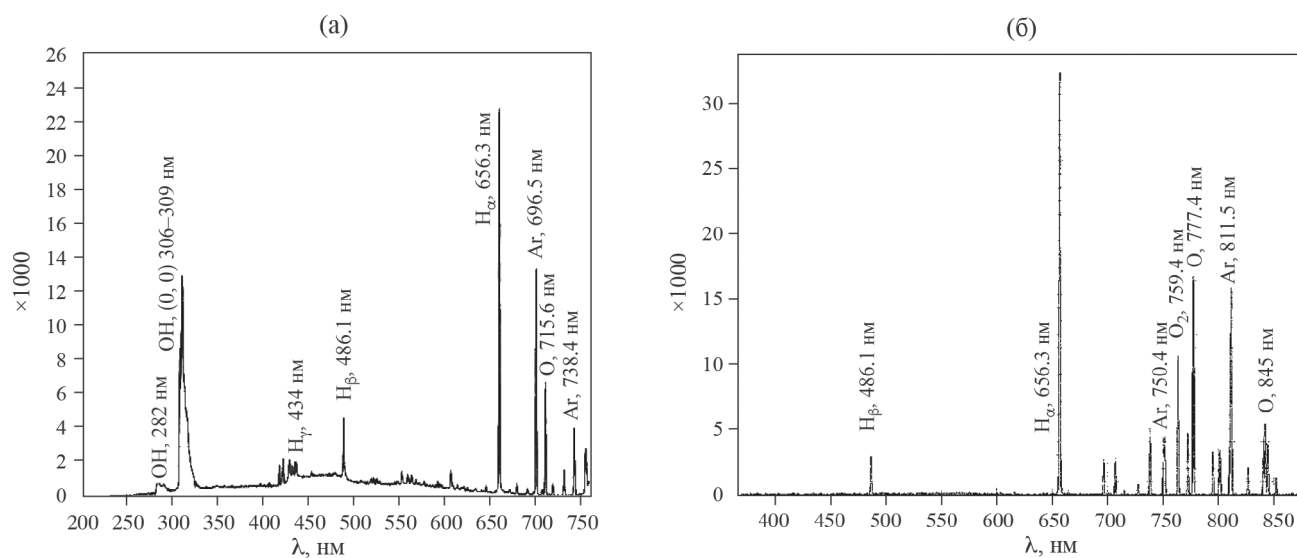


Рис. 2. ОЭС плазменного факела, стабилизированного водяным паром: а) УФ и синяя области спектров; б) красная и ИК-области спектров.

где $\Delta\lambda_{1/2} = \sqrt{\Delta\lambda_{1/2\text{exp}}^2 - \Delta\lambda_{1/2\text{inst}}^2}$ — полуширина спектральной линии с учетом инструментальной ошибки; n_e — концентрация электронов, м^{-3} ; N_D — число заряженных частиц в дебаевской сфере; $n_1 = 3$, $n_2 = 2$ — верхнее и нижнее главные квантовые числа для H_α ; $Z_e = 1$ — ядерный заряд излучающего атома; $Z_p = 1$ — кратность заряда ионов; $\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$ — длина волны, соответствующая центру спектральной линии. Результат расчета концентрации электронов: $n_e = 9 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Число N_D , зависящее от температуры плазмы, в диапазоне $1 \text{ эВ} \leq T \leq 2 \text{ эВ}$ изменяется от 14 до 40 и существенно не влияет на результат вычисления n_e .

Исходя из баланса давлений на границе контрагированного плазменного столба факела и окружающей его атмосферы, состоящей из смеси аргона и пара, имеющей давление, близкое к атмосферному, P_0 ,

$$(n_a + n_e)kT = P_0, \quad (2)$$

определяем степень ионизации $\chi = n_e/(n_a + n_e) = n_i/(n_a + n_i)$, где n_a — концентрация нейтральных атомов Ar в факеле), которая позволяет вычислить равновесную концентрацию n_e и температуру плазмы T из совместного решения трех уравнений: (1), (2) и уравнения Саха [20]. В аргоне при атмосферном давлении электронная, ионная и газовая температуры в плазме совпадают: $T = T_e = T_i = T_a \text{ эВ}$ — вследствие термодинамического равновесия, которое имеет место, когда $n_e \geq 3 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ [21]. При низкой степени ионизации, $\chi \ll 1$, уравнение Саха для $n_e = f(T)$ в системе СИ принимает вид:

$$n_e = \sqrt{2n_a \frac{g_i}{g_a}} \frac{1}{\sqrt{\lambda_{Th}^3}} e^{-\frac{J_i}{T}} \quad (3)$$

где $g_i = 6$, $g_a = 1$ — статистические веса квантовых состояний иона и атома соответственно; $\lambda_{Th} = \frac{h}{\sqrt{2\pi m_e k_B T}}$ — средняя длина волны де Бройля для электронов с температурой T , $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — постоянная Планка; $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ кг}$ — масса электрона; $J_i = 15.58 \text{ В}$ — потенциал ионизации атома Ar . Из решения системы уравнений найдена температура: $T \approx 1.8 \text{ эВ}$.

3.3. Распределение температуры воды и пара в реакторе

Сохранение генерируемого пероксида водорода H_2O_2 требует учета влияния температуры воды, которая нагревается двумя источниками тепла: плазмой СВЧ-факела и потоком пара от внешнего парогенератора. На рис. 3а показано распределение

температуры воды $T(r)$, нагреваемой форсированным потоком пара (расход 90 л/мин) на различных глубинах h погружения термопары, через час после включения потока пара. Начало координат $h = 0$ выбрали на поверхности невозмущенной воды. Нагрев воды струей пара, падающей на ее поверхность, отличается неравномерностью температуры по радиусу r в сравнении с глубокими слоями. Однако нагрев воды потоком пара и плазмой факела (рис. 3б) отличается более высокой температурой и большей однородностью по радиусу r , при этом имеет лишь небольшой подъем температуры в центре под факелом и спад у охлаждаемой стенки камеры. Пар бурно кипящей воды под факелом заполняет объем камеры над водой и достаточно равномерно передает тепло воде через поверхность. Мощность, отдаваемая СВЧ-факелом на нагрев воды, составляет по калориметрическим оценкам около 50 Вт. Поскольку вода имеет низкую теплопроводность, за 1 час обработки нагреваются преимущественно верхние слои воды глубиной от 1 до 3 см (рис. 3б). Температурная инверсия, при которой нагретые верхние слои воды с меньшей плотностью, чем более плотные слабо нагретые глубокие слои, препятствует перемешиванию воды естественной конвекцией. Температура воды в направлении по радиусу за счет нагрева плазмой выравнивается быстрее, чем при нагреве одним паром, из-за расходящихся от центра поверхностных волн на воде, вызываемых турбулентным гидродинамическим давлением плазменной струи. На рис. 4 показан осевой профиль температуры в камере воды и пара над водой в условиях рис. 3 отдельно для нагрева потоком пара 90 л/мин — 1 и плазмой СВЧ-факела, стабилизированного потоком пара с расходом 11 л/мин, — 2.

При переходе спая термопары через границу вода-пар температура скачкообразно возрастает в слое $\Delta h \sim 1 \text{ см}$. Показания термопары над водой находятся вблизи точки кипения 100°C , но оказываются заниженными из-за погрешности, связанной с потерей тепла через теплопередачу от спая термодатчика к экранирующей его трубке.

Параллельно с нагревом воды идет активное парообразование в зоне контакта плазма-вода. Мощность, затрачиваемую факелом на парообразование, определяли по объему конденсата пара, собираемого из холодильника, и удельной теплоте парообразования. Опыт проводили со стеклянным резервуаром с водой объемом 0.5 л, помещенном в камеру реактора на вертикально перемещаемом столике для вариации высоты Δ от воды до сопла.

Конденсат собирали отдельно в стакане под патрубком холодильника. Факел в этом опыте стабилизировали потоком азота, чтобы исключить конденсат от внешнего генератора пара. Объем испаренной воды V_u за время 10-минутной экспозиции в зависимости от величины Δ показан на рисунке 5. Правая шкала графика соответствует расчетной мощности P_n , идущей на парообразование.

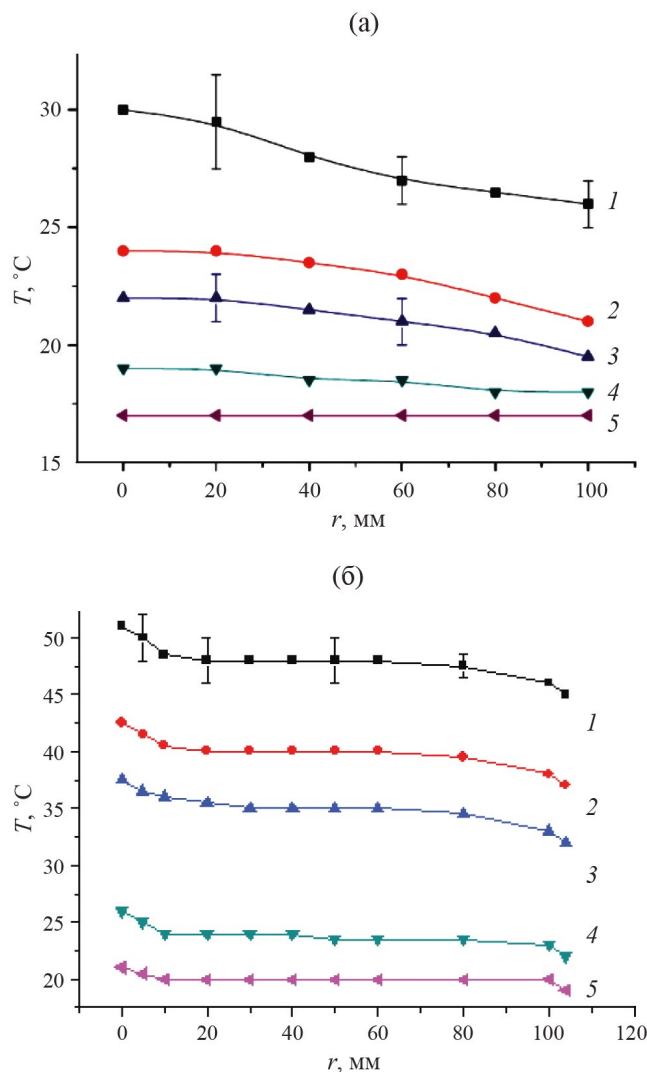


Рис. 3. а,б) - Распределение температуры $T(r)$ в воде на различных глубинах погружения термопары h спустя 1 час работы плазматрона при расстоянии $\Delta = 20$ мм от сопла плазматрона до воды. Начальный объем воды в камере – 3.2 л в условиях конденсации пара, поступающего из парогенератора, поддерживали постоянным: (а) Зависимость $T(r)$ под действием форсированного потока пара (расход пара 90 л/мин), h : 1 – 1 см; 2 – 2 см; 3 – 4 см; 4 – 6 см; 5 – 8.5 см, (вблизи дна); (б) под действием плазмы СВЧ-факела и потока пара: 1 – 1 см; 2 – 2 см; 3 – 3 см; 4 – 4.5 см; 5 – 8.5 см.

3.4. Измерение концентрации $[H_2O_2]$ в воде, активированной СВЧ-плазмой

Для количественного определения плазменного воздействия на воду провели измерения концентрации $[H_2O_2]$ в зависимости от продолжительности обработки воды плазмой на разных расстояниях между соплом и водой D при значении объемного расхода пара 11 л/мин., оптимально стабилизирующего факельный СВЧ-разряд.

Изменение концентрации $[H_2O_2]$ в течение первого часа обработки плазмой характеризуется линейным ростом во времени, затем темп роста замедляется и через 150 минут $[H_2O_2]$ асимптотически приближается к некоторому пределу, что видно на рис. 6. При ($\Delta_{\text{мин}} = 15$ мм) предельное значение концентрации $[H_2O_2]$, измеренное через 2.5 часа, $\sim (4,5 \pm 0,3) \times 10^{-2}$ г/л.

Для установления зависимости образования пероксида водорода от положения факела над водой провели измерения концентрации $[H_2O_2]$ в зависимости от Δ в пределах изменения $20 \leq \Delta \leq 95$ мм на 80-й минуте обработки плазмой (рис. 7, кривая 1).

Жизнеспособность полученных растворов ПАВ была проверена при хранении при температуре 20°C в закрытой ПЭТ-бутылке из полиэтилентерефталата в течение двух недель (рис. 8). График зависимости концентрации $[H_2O_2] = f(t)$ построен по измерениям фотометром PoolLab-1.0. Сплошная точка в начале зависимости – измерения этого же раствора хемилуминометром Lum-100 с участием

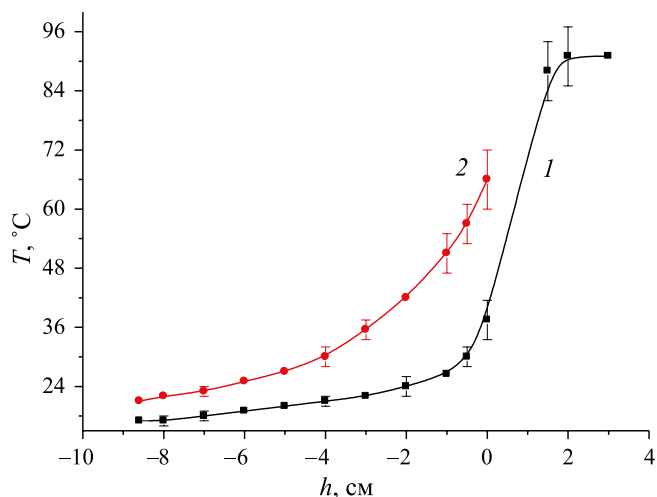


Рис. 4. Распределение температуры на оси камеры ($r = 0$) в зависимости от глубины погружения спая термодатчика в воду, $T(h)$, после 1 часа работы парогенератора с расходом 90 л/мин: (1) без включения плазматрона и (2) при включенном плазматроне, мощность 1,2 кВт. На поверхности воды: $h = 0$

люминола и катализатора распада H_2O_2 (пероксидазы хрена). Снижение показаний концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2]$ на 40% в течение первых 6 суток до установившегося уровня требует более глубокого анализа состава АФК.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образование АФК и H_2O_2 в воде в газовой и жидкой фазах при атмосферном давлении под воздействием плазмы СВЧ-факельного разряда связано с тремя физико-химическими механиз-

мами разложения воды: 1) термической диссоциацией, 2) фотодиссоциацией под действием вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения плазмы и 3) реакциями молекул воды с электронами плазмы, в т. ч. сольватированными на контакте плазмы с водой.

Известно, что термическая диссоциация водяного пара [22] в равновесной системе при давлении 1 атм происходит в диапазоне температур $2000 < T < 5000$ К, при этом с ростом T содержание паров воды (в мольных долях) монотонно снижается до 0, а содержание атомов водорода и кислорода моно-

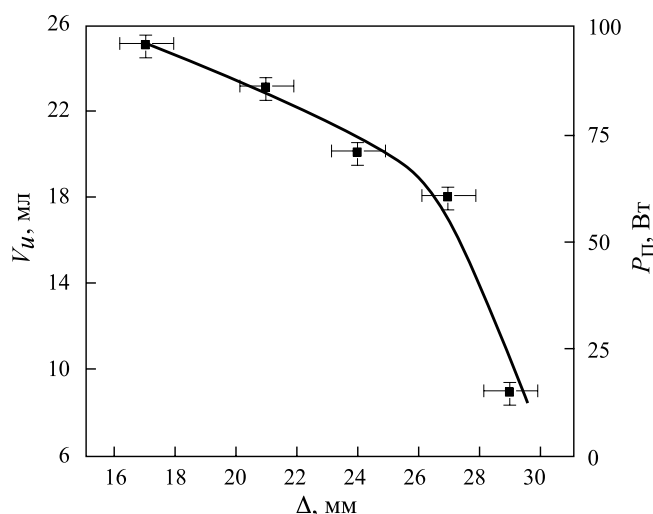


Рис. 5. Зависимость объема воды, испаренной в течение 10 минут плазменным факелом от расстояния (сопло-вода), $V_u = f(\Delta)$. Факел стабилизирован потоком азота. Справа — шкала мощности, затраченной на парообразование.

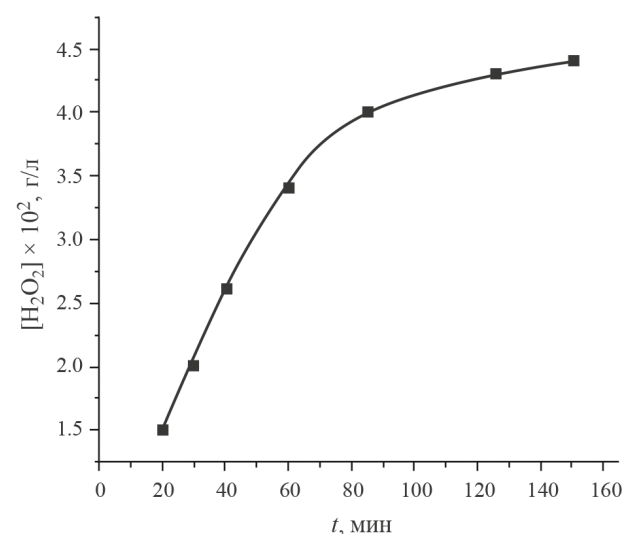


Рис. 6. Концентрация $[\text{H}_2\text{O}_2]$ в воде в зависимости от времени обработки плазмой СВЧ-факела при минимально допустимом расстоянии от сопла до воды $\Delta_{\text{мин}} = 15$ мм.

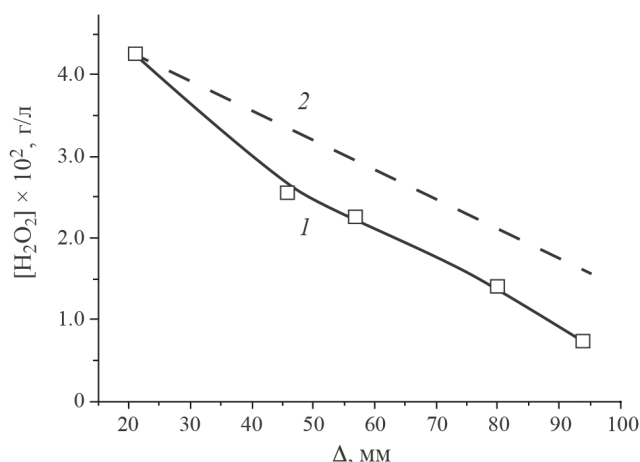


Рис. 7. Концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2]$ в воде: 1 — в зависимости от расстояния между соплом и водой Δ , достигнутая в момент $t = 80$ мин; 2 — расчетная зависимость изменения $[\text{H}_2\text{O}_2]$ от Δ в относительных единицах.

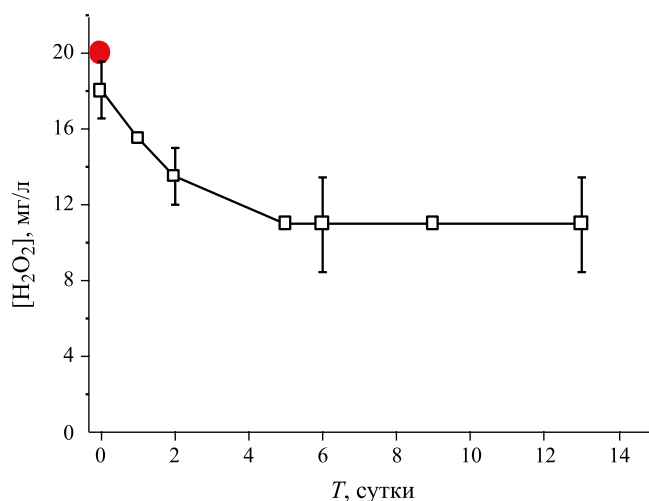
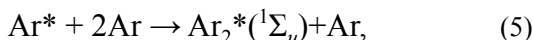
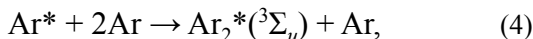


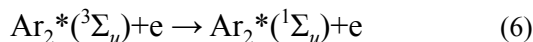
Рис. 8. График зависимости концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2]$ в ПАВ от времени хранения в холодильнике по измерениям при $T = 20^\circ\text{C}$ фотометром PoolLab-1.0. Сплошная точка в начале зависимости — результат измерения этого раствора хемилюминесцентом Lum-100 с катализатором (пероксидазой хрена).

тонно растет до максимума. Гидроксил OH^- и молекулярные водород H_2 и кислород O_2 с ростом температуры изменяются немонотонно — начиная с 2400 К их плотности растут линейно, а затем в процессе нарастающей диссоциации падают до 0. В области температур ~ 3600 К молярные доли N компонентов H_2O , OH , H , O , H_2 принимают близкие значения $\sim 0,2$, а $\text{O}_2 \sim 0,1$. Короткоживущий в нормальных условиях гидроксил OH при указанной температуре находится в равновесии с концентрацией пара H_2O . Однако термическая диссоциация из-за ограниченного объема плазмы с высокой температурой в паровой среде не может быть существенным процессом в образовании АФК.

Главную роль в образовании АФК в воде и паровой среде играет ВУФ-излучение плазмы факела. Аргон в основном состоянии — инертный газ, а в возбужденном состоянии он становится химически активным, способным образовывать эксимеры. Эксимер [23] — двухатомная молекула с возбужденным состоянием атомов, которые образуют устойчивую связь, а ниже, основное состояние — слабосвязанное, легко распадающееся на атомы. Эксимерное состояние Ar_2^* формируется вследствие каскада трехчастичных столкновений в реакциях [24, 25]:



причем столкновения долгоживущих триплетных димеров аргона с электронами, преобразуют их в излучающие синглетные эксимеры:



В [25] представлена диаграмма возбуждаемых уровней и связанных переходов между атомами и молекулами аргона. Энергетические уровни возбужденных состояний атомов аргона: (метастабильный $\text{Ar}(^3\text{P}_2)$ — 11.548 эВ), 13.328 эВ, 14.499 эВ и порог ионизации — 15.76 эВ. Возбужденные состояния молекул (димеров) аргона лежат в интервале энергий 11–15 эВ. Генерирующие ВУФ-излучение переходы связаны с нижними эксимерными уровнями (~ 11 эВ) $^1\Sigma_u$ синглетным и $^3\Sigma_u$ триплетным, первый из которых дает при переходе в основное состояние ВУФ-эмиссию, а долгоживущий второй преобразуется в синглетный в трехчастичных столкновениях.

Примерами разрядов в атмосфере с участием эксимеров в аргоне могут служить скользящий поверхностный разряд на диэлектрике [24] и диэлектрический барьерный разряд [25]. Непрерывный СВЧ-разряд в аргоне атмосферного давления с плотностью поглощаемой мощности в факеле $\sim 10^4$ Вт/см³,

может иметь ту же природу, связанную с образованием эксимеров аргона и ВУФ-излучения первого и второго континуумов $\text{Ar}_2^* \ ^1\Sigma_u^+(0)$. Второй имеет большее практическое значение, его длина волны в максимуме полосы — 126 нм (энергия 9,8 эВ). Максимум интенсивности второго континуума, в интервале давлений $0,3 < p < 3$ атм изменяется пропорционально p^2 [24] и при большем давлении переходит в насыщение. Важная особенность разрядов с участием эксимеров — отсутствие самопоглощения на связанно-свободных молекулярных переходах, что минимизирует потери и определяет высокую эффективность преобразования энергии в излучение от 40 до 60% вложенной энергии. Генерации континуума сопутствует эмиссия линий аргона 750,4 нм и 811,5 нм ближнего инфракрасного (БИК) спектра [24, 25]. В спектре рисунке 2б четко видна пара этих БИК-линий, что косвенно подтверждает эксимерную природу ВУФ-излучения. Третий континуум в спектре излучения СВЧ-разряда, наблюдаемый на рисунке 2а в диапазоне длин волн $250 \leq \lambda \leq 700$ нм, является, вероятно, фоторекомбинационным. Его интенсивность зависит от электронной плотности в канале разряда, которая растет пропорционально n_e^2 [24]. Однако в области длин волн третьего рекомбинационного континуума возможно наложение спектра флуоресценции водяного пара [18].

Рисунки 3 и 4 представляют распределение температуры воды и пара в камере спустя час после начала обработки плазмой. Нагрев воды идет в основном через ее поверхность. Проникновение СВЧ-излучения в дистиллированную воду с температурой $T_g = 25^\circ\text{C}$ при нормальном падении составляет ~ 1 см, с ростом температуры до $T_g = 56^\circ\text{C}$ глубина проникновения возрастает до $\sim 2,5$ см. Определить вклад СВЧ-мощности в нагрев воды, не поглощенной плазмой и излучаемой факелом как антенной, оказалось трудной задачей из-за общего нагрева воды всеми источниками тепла и излучения плазменного факела.

На рис. 5 показано изменение объема воды, испаренной плазмой факела в зависимости от расстояния Δ между соплом и водой, которое косвенно характеризует степень прямого влияния плазмы на воду при погружении в нее факела. Резкий спад зависимости объема испаренной воды при $\Delta = 26$ мм по мере удаления факела соответствует переходу через контакт факела с водой, т. к. длина видимой части факела около 25 мм. Эта зависимость указывает на возможное участие плазмы электронов в гидратации и образовании АФК.

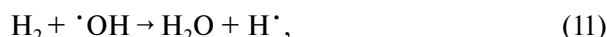
Поглощение ВУФ-излучения водой имеет отношение не столько к нагреву воды, сколько к физико-химическому преобразованию поглощенной энергии в АФК. Известно из [27], что излучение эксимеров, например ксенона, с длиной волн вблизи 172 нм полностью поглощается в слое жидкой воды толщиной в 110 мкм. С укорочением длины волны от 190 до 120 нм длина поглощения становится короче, при этом квантовый выход фотодиссоциации возрастает с 0.4 до 1. В насыщенном пару при атмосферном давлении, плотность которого в 10^3 раз меньше плотности воды, длина поглощения ВУФ-излучения увеличивается до сантиметров. Воздействие на воду и пар излучения второго ВУФ-континуума эксимера аргона с энергией фотонов около 9.8 эВ не может ионизировать воду из-за высокого потенциала ионизации, $I_{\text{H}_2\text{O}} = 12.62$ эВ, однако, осуществляет фотолиз молекул с энергией их ковалентной связи 5.07 эВ. Фотолиз происходит с предельно высокой эффективностью, близкой к 1. В результате реакции образуются свободные радикалы водорода и гидроксила [27]:

$\text{H}_2\text{O} + h\nu (\lambda = 126 \text{ нм}, E = 9.8 \text{ эВ}) \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}\cdot$, (7)
из которых образуются АФК.

Столкновения молекул воды с метастабильными атомами аргона с энергией возбуждения также способны вызвать распад воды на свободные радикалы:



Радикалы, образованные по реакциям (7), (8), могут исчезать в реакциях:



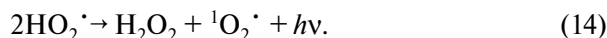
а также могут синтезировать пероксид водорода:



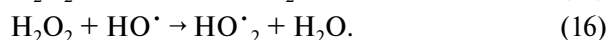
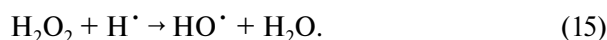
а со свободным кислородом образовывать гидропероксильный радикал:



Два гидропероксильных радикала в реакции дисмутации [28] синтезируют пероксид водорода H_2O_2 и кислород в синглетном состоянии:



Молекула H_2O_2 , вступая в реакции со свободными радикалами из реакции (1), разлагается до воды с гидроксильным (15) и гидропероксидным (16) радикалами:



Значимая роль в образовании АФК может принадлежать супероксиданион-радикалу (СОР) $\text{O}_2^{\cdot-}$, появляющемуся в реакции присоединения электрона к молекуле кислорода O_2 в основном состоянии:



Реакция (17) может протекать в воде с растворенным в ней кислородом на контакте плазменного факела с водой и в пару, где кислород образуется вследствие диссоциации пара в горячей зоне плазменного факела (см. выше). С потоком аргона радикалы переносятся в воду. В водном растворе радикал $\text{O}_2^{\cdot-}$ находится в равновесии с его кислотной формой — гидропероксидом:



который может распадаться на ион водорода и СОР:



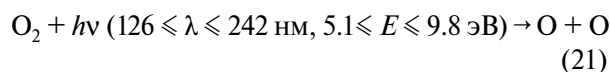
Принято считать, что СОР существует в водном растворе при $\text{pH} < 4.8$ практически полностью в форме HO_2 , а при $\text{pH} > 4.8$ — в форме $\text{O}_2^{\cdot-}$.

Получаемые в реакциях (16) и (18) радикалы HO_2 образуют молекулы H_2O_2 и молекулы синглетного кислорода ${}^1\text{O}_2$ по реакции (14). Время жизни СОР в воде составляет несколько миллисекунд.

В водной среде два СОР могут аналогично (14) спонтанно образовывать молекулу H_2O_2 и кислорода:



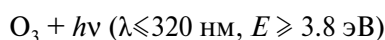
Озон O_3 , который тоже относят к АФК, образуется в результате фотолиза кислорода УФ-излучением плазмы:



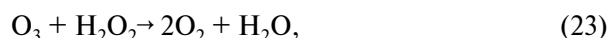
в реакции:



и затем легко распадается в результате фотолиза под влиянием ближнего УФ-излучения:



или в столкновениях с атомами кислорода с образованием двух молекул кислорода. Озон, образовавшийся в водном растворе H_2O_2 , неустойчив — он распадается сам за счет атомов, заимствованных у пероксида водорода по реакции:



с коэффициентом скорости разложения $k = (0.023 \pm 0.002) \text{ л}/(\text{моль} \times \text{с})$ [29]. Озон в отстоявшемся растворе H_2O_2 , полученном обработкой воды СВЧ-плазмой, не был обнаружен. Таким образом, раствор пероксида водорода можно считать конечным продуктом всех перечисленных реакций.

Динамика изменения содержания H_2O_2 в дистиллированной воде в процессе обработки воды плазмой (рис. 6) носит квазилогарифмический характер. По мере того как с течением времени концентрация $[\text{H}_2\text{O}_2]$ достигает достаточно высоких значений, скорость обратных реакций (9–11), (15), (16) тоже растет пропорционально концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2]$ и будет расти до тех пор, пока не установится равновесная концентрация, при которой скорость образования H_2O_2 не станет равной скорости распада с превращением в воду. Затраты энергии на производство пероксида водорода после 90 минут обработки плазмой становятся неэффективными. Количественный анализ процессов синтеза пероксида водорода и его распада под действием ВУФ-излучения плазмы аргона чрезвычайно сложен из-за того, что процессы в паровой и жидкой фазах невозможно разделить.

Гидратированные электроны (e^-_{aq}) плазмы, которые попадают в воду через ее контакт с водой, вступают в реакции с растворенным кислородом O_2 согласно (17) [29] и с первичными радикалами фотолиза Н и ОН (7, 8). В результате реакций образуются супероксиданион $\text{O}_2^{\cdot-}$ и пергидроксильные радикалы HO_2 , которые по уже известным реакциям преобразуются в пероксид водорода.

Измеренная зависимость концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2]$ от расстояния от сопла до воды Δ при постоянстве параметров разряда (кривая 1 рис. 7) позволяет оценить вклад разных механизмов в образование пероксида водорода (ПВ). Если предположить, что основным механизмом образования ПВ является фотолиз, а источник излучения считать точечным, находящимся на дистанции Δ , то концентрация $[\text{H}_2\text{O}_2]$ с ростом Δ должна в относительных единицах уменьшаться пропорционально интегралу светового потока, поглощаемого поверхностью воды в сужающемся с ростом Δ телесном угле конуса Ω , согласно выражению:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha) = 2\pi\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R/\Delta)^2}}\right] \quad (24)$$

где α — плоский угол при вершине между осью и образующей конуса, $R = 11$ см — радиус камеры и основания конуса. Расчетная зависимость (24) нормированная в первой точке при $\Delta = 2$ см (кривая 2 рис. 7), прошла выше измеренной. Наклон кривых 1 и 2 при $\Delta \geq 4$ см оказался почти одинаковым. Более крутой спад кривой 1 при $\Delta \leq 4$ см можно считать дополнительным вкладом гидратированных плазменных электронов в синтез H_2O_2 . В случае отсутствия фотолиза образование H_2O_2 закончилось бы при $\Delta \sim 3$ см, когда факел отрывается от воды.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Факельный СВЧ-разряд в струе аргона, стабилизированный потоком чистого водяного пара, позволяет проводить активацию воды и получение чистого водного раствора H_2O_2 при атмосферном давлении в условиях изоляции от атмосферы. В плазмохимических реакциях участвуют только вода в жидком и газообразном состояниях и инертный аргон. Показано, что конечным продуктом СВЧ-активации воды является чистый раствор пероксида водорода, для получения которого используются дистиллированная вода, сжатый аргон и электро-энергия. Если создать систему осушения отработавшего аргона с его последующей компрессией, аргон можно многократно использовать в замкнутом цикле, что сократит потребность в нем в сотни раз.

Концентрация H_2O_2 в водном растворе ограничена значением 4.5×10^{-2} г/л $\sim 10^{-3}$ М, что связано с включением в процесс образования H_2O_2 обратных физико-химических реакций его распада, которые определяют предел получаемой концентрации. Эта концентрация пероксида водорода в растворе достаточна для использования в биологии и медицине, так как требуется дополнительное разбавление на 2–3 порядка величины.

Показано, что фотолиз воды является основным механизмом образования радикалов, конечным продуктом реакций которых в воде становится пероксид водорода. Длина волны УФ-излучения, которой ограничивается фотолиз воды, — 243 нм. В спектре УФ-излучения плазмы СВЧ-факела в наблюдаемой области $200 \leq \lambda \leq 250$ нм интенсивной эмиссии излучения не обнаружено, что позволяет сделать вывод, что образование АФК и H_2O_2 в воде и в водяном паре обязано преимущественно эксимерному ВУФ-излучению аргона, наличие которого косвенно подтверждается эмиссией линий аргона с длинами волн 750.4 и 811.5 нм.

Авторы благодарны В.А. Иванову за обсуждение результатов работы и полезные замечания, В.П. Бармину, О.М. Герасимову, С.Н. Сатунину за помощь в проведении экспериментов, А.А. Летуну за консультации в спектральных измерениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по Госзаданию по теме «Плазма» (Физика высокотемпературной плазмы и фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий)» FFWF-2023-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asimov I. A Short history of chemistry. Heinemann, London, 1972
2. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardniers J.G. E., Graham W.G., Graves D.B., Hofman-Caris R.C. H.M., Maric D., Reid J.P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J.E., Garrick S.C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krema F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E.C., Pawlat J., Petrovic Z.Lj., Pflieger R., Reuter S., Schram D.C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P.A., Verlet J.R. R., von Woedtk T., Wilson K.R., Yasui K. and Zvereva G. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. 25 053002 (59 pp). Doi:10.1088/0963-0252/25/5/053002
3. Bansode A.S., More S.E., Siddiqui E.A., Satpute S., Ahmad A., Bhoraskar S.V., Mathe V.L. // Chemosphere. 2017. 167. P. 396–405. Doi:10.1016/j.chemosphere.2016.09.089
4. Marinova P., Benova E., Topalova Y., Todorova Y., Bogdanov T., Zhekova M., Yotinov I., Krema F. // Effects of Surface-Wave-Sustained Argon Plasma Torch Interaction with Liquids. Processes. 2023. V. 11. P. 3313. <https://doi.org/10.3390/pr11123313>
5. López M., Calvo T., Prieto M., Múgica-Vidal R., Muro-Fraguas I., Alba-Elías F., Alvarez-Ordóñez A. // Front. Microbiol. 2019. Sec. Food Microbiology V. 10. Doi.org/10.3389/fmicb.2019.00622
6. Андреев С.Н., Анашева Л.М., Ашууров М.Х., Лукина Н.А., Сапаев Б., Сапаев И.Б., Сергейчев К.Ф., Щербаков И.А. // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 3. С. 297.
7. Сергейчев К.Ф., Лукина Н.А., Анашева Л.М., Овчаренко Е.Н., Лобанов А.В. // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 60. Doi: 10.1134/S1990793122010134
8. Toyokuni S., Ikehara Y., Kikkawa F., Hori M. Plasma Medical Science. Academic Press, 2018. P. 458.
9. Kong M.G., Morfill G., Stolz W., Plasma Medicine / Ed. Laroussi M. Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
10. Puschner G. Heating with microwaves. Fundamentals, components and circuit technique, 1966.
11. Сергейчев К.Ф., Лукина Н.А., Арутюнян Н.Р. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 6. С. 513. Doi:10.1134/S036729211906009X
12. Moisan M., Nowakowska H. // Plasma Sources Sci. and Technol. 2018. V. 27. № 7. Doi:10.1088/1361-6595/aac528
13. Сергейчев К.Ф., Минаев И.М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах // Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова. 2014. Т. 70. С. 143.
14. Сергейчев К.Ф., Лукина Н.А., Андреев С.Н., Анашева Л.М., Савранский В.В., Лобанов А.В. Патент РФ 2019. RU 2 702 594 C1.
15. Sergeichev K.F., Lukina N.A., Sarimov R.M., Smirnov I.G., Simakin A.V., Dorokhov A.S., Gudkov S.V. // Front. Phys., 2021. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.614684>
16. Сергейчев К.Ф., Хаваев В.Б., Лукина Н.А. Патент РФ № RU 2761437 C1.
17. Tikhonov V.N., Aleshin S.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V. // J. of Physics. Conf. Series. 2017. 927 012067. doi:10.1088/1742-6596/927/1/
18. Belovolova L.V., Glushkov M.V., Vinogradov E.A., Babintsev V.A., Golovanov V.I. // Phys. of Wave Phenom. 2009. V. 17. № 1. P. 21.
19. Плазма в лазерах / под ред. Дж. Бекефи. М.: Энергоиздат, 1982. 411 с.
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Saha_ionization_equation
21. Колесников В.Н. Дуговой разряд в инертных газах. // Труды ФИАН. 1964. Т. 30. С. 66.
22. Справочник химика. 21. Химия и химическая технология. Параграф 29, 29. С. 173. Рис. V, 3.
23. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.
24. Lisovski A.A., Treshchalov A.B. // Proc. SPIE 6263, Atomic and Molecular Pulsed Lasers VI, 626 30H 2006; <https://doi.org/10.1117/12.677401>
25. Baricholo P., Hlatywayo D.J., Von Bergmann H.M., Stehmann T., Rohwer E., Collier M. // S. Afr. J. Sci. 2011. V. 107 (11/12). Art. #581. P. 7. Doi.org/10.4102/sajs.v107i11/12.581
26. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. Томск: STT, 2011. 512 с.
27. Зверева Г.Н. Исследование разложения воды вакуумным ультрафиолетовым излучением // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108. № 6. С. 787.
28. Беловолова Л.В. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 7. С. 923. Doi: 10.21883/OS.2020.07.49565.64-20
29. Разумовский С.Д., Гриневич Т.В., Коровина Г.В. Химическая физика. 2011. Т. 30. № 10.

PHYSICOCHEMICAL ACTIVATION OF DISTILLED WATER BY A JET OF MICROWAVE PLASMA ARGON IN AN ATMOSPHERE OF WATER VAPOR

K. F. Sergeichev^{a,*}, N. A. Lukina^a

^a*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: k-sergeichev@yandex.ru*

Abstract—A method for activating water by plasma of an electrodeless torch discharge in a microwave electromagnetic field in argon in an environment of water vapor, at atmospheric pressure, to obtain a pure solution of hydrogen peroxide H₂O₂ without impurities in distilled water is proposed. It is shown that the main mechanism for the formation of atomic hydrogen H • and hydroxyl HO • radicals in the water decomposition is photolysis under the influence of excimer vacuum ultraviolet radiation of argon plasma. Hydrated electrons can be an additional source of radicals in liquid water when the plasma torch comes into contact with the water surface. Today plasma technologies are widely used to produce activated water containing hydrogen peroxide, to solve environmental problems, to increase productivity in agriculture, and for medical use.

Keywords: microwave discharge, argon, plasma, torch, distilled water, water vapor, excimer, reactive oxygen species, hydrogen peroxide