

ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМА-АКТИВИРОВАННОЙ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ И ГРУНТОВОЙ ВОД
А.Ю. Рябов, С.В. Кудряшов, В.А. Панарин, Э.А. Соснин, В.С. Скакун, Д.А. Сорокин

Андрей Юрьевич Рябов (ORCID 0000-0001-5686-3006) *, Сергей Владимирович Кудряшов (ORCID 0000-0002-6734-2123)

Институт химии нефти СО РАН, пр. Академический 4, Томск, Российская Федерация, 634055
E-mail: a.y.raybov@yandex.ru *, ks@ipc.tsc.ru

Виктор Александрович Панарин, Дмитрий Алексеевич Сорокин (ORCID 0000-0002-6884-2525), Виктор Семенович Скакун, Эдуард Анатольевич Соснин (ORCID 0000-0003-4728-8884)

Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: panarin@yandex.ru, skakun@loi.hcei.tsc.ru, SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru, badik@loi.hcei.tsc.ru

Проведено сравнительное исследование некоторых физико-химических свойств водных растворов, полученных в результате обработки дистиллированной и грунтовой вод импульсными разрядами. Определено изменение водородного показателя, проводимость раствора и содержание анионов NO_3^- и катионов Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ и Na^+ , дана интерпретация выявленных фактов. Воздействие на водные объекты осуществляли активными частицами, образующимися в воздухе под действием импульсного разряда в двух вариантах реализации высоковольтного электрода. Первый вариант предполагал зажигание разряда в воздушном пузыре при непосредственном контакте его с жидкостью и условно называется «пузырьковый». Второй вариант организован таким образом, что активные частицы образуются в потоке воздуха под действием барьерного разряда и после выдуваются в жидкость. Показано, что разряд в пузырьках дает большую производительность по анионам NO_3^- в грунтовой воде, а в дистиллированной воде лучшая эффективность в образовании анионов NO_3^- наблюдается у барьерного разряда. Водородный показатель для грунтовой воды повышается с 8,1 до 8,6 рН в процессе 10-минутной обработки обоими вариантами разряда, для дистиллированной воды наблюдается обратная зависимость - происходит уменьшение его значения с 7,5 до 3,5 рН. При обработке грунтовой воды наблюдается многократное увеличение содержания катионов Ca^{++} и Mg^{++} в водном образце, предположительно, их увеличение в растворе связано с переходом нерастворимых солей карбонатов кальция и магния (постоянная жесткость воды) в растворимые в воде нитраты (временная жесткость). Помимо ионов магния и кальция в водных образцах отслеживались катионы калия и натрия. Обработка разрядами не оказывает существенного влияния на их концентрацию в воде.

Ключевые слова: барьерный разряд, водородный показатель, жесткость воды, разряд в пузырьках, плазма-активированная вода

EFFECT OF THE FORM OF ELECTRIC DISCHARGE ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF PLASMA-ACTIVATED DISTILLED AND GROUND WATERS

A.Y. Ryabov, S.B. Kudryashov, V.A. Panarin, E.A. Sosnin, V.S. Skakun, D.A. Sorokin

Andrey Y. Ryabov (ORCID 0000-0001-5686-3006) *, Sergey B. Kudryashov (ORCID 0000-0002-6734-2123)

Institute of Petroleum Chemistry, Akademichesky ave., 4, Tomsk, 634055, Russia
E-mail: a.y.raybov@yandex.ru *, ks@ipc.tsc.ru

Victor A. Panarin, Eduard A. Sosnin (ORCID 0000-0003-4728-8884), Victor S. Skakun, Dmitry A. Sorokin (ORCID 0000-0002-6884-2525)

Optical Radiation Laboratory, Institute of High Current Electronics of the SB RAS, Akademicheskyy ave., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: panarin@yandex.ru, skakun@loi.hcei.tsc.ru, SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru, badik@loi.hcei.tsc.ru

A comparative study of some physicochemical properties of aqueous solutions resulted from the treatment of distilled and ground waters by pulsed discharges has been performed. Changes in the pH value, the conductivity of the solution, and the content of NO_3^- anions and Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , and Na^+ cations were studied. Water bodies were affected by active particles formed in the air under the action of a pulsed discharge, which is implemented in two options. The first option is conventionally called 'bubble discharge' since it assumes the ignition of a discharge in an air bubble in direct contact with a liquid. The second option is the case when active particles, which are formed in an air stream under the action of a barrier discharge, are blown into a liquid. It is shown that the bubble discharge in ground water gives the maximum performance for the NO_3^- anions, while in the case of barrier discharge the best performance in the formation of NO_3^- anions is observed in distilled water. The pH value for ground water increases from 8.1 to 8.6 in the course of a 10-minute treatment using both discharges. However, in the case of distilled water treatment an inverse relationship is observed, so its value decreases from 7.5 to 3.5 pH. A multiple increase in the content of Ca^{++} and Mg^{++} cations in the water sample is observed when groundwater treating. Presumably, their increase in solution is associated with the transition of insoluble salts of calcium and magnesium carbonates (constant water hardness) into water-soluble nitrates (temporary hardness). In addition to magnesium and calcium ions, potassium and sodium cations were monitored in water samples. Their concentration in water was insignificantly affected by the treatments with discharges.

Key words: barrier discharge, pH value, water hardness, bubble discharge, plasma-activated water

Для цитирования:

Рябов А.Ю., Кудряшов С.В., Панарин В.А., Соснин Э.А., Скакун В.С., Сорокин Д.А. Влияния формы электрического разряда на физико-химические свойства плазма-активированной дистиллированной и грунтовой вод. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 30–36. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6880.

For citation:

Ryabov A.Y., Kudryashov S.B., Panarin V.A., Sosnin E.A., Skakun V.S., Sorokin D.A. Effect of the Form of electric discharge on physicochemical properties of plasma-activated distilled and ground waters. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 30–36. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6880.

ВВЕДЕНИЕ

Междисциплинарные исследования, посвященные воздействию разрядной плазмы на воду или водные растворы, ведутся очень интенсивно [1-8].

Все исследования можно условно разделить на три группы: 1) изучение состава обработанной воды и кинетики реакций в разряде и водных растворах; 2) разработка и испытание разрядных реакторов; 3) выявление полезных свойств полученных растворов в лабораторных условиях.

В рамках этого направления исследования отдельное место занимает техника получения плазма-активированной воды (ПАВ). ПАВ - это продукт воздействия плазмы на воду или водные растворы (например, фосфатно-буферный физиологический раствор и др.) в присутствии O_2 или смеси O_2 и N_2 , при атмосферном давлении [9].

В биомедицине применение ПАВ продемонстрировано в задачах удаления биопленок, заживления ран, инактивации бактерий [10-12].

В сельском хозяйстве ПАВ предлагается использовать для увеличения скорости прорастания семян и последующего роста рассады и растений, инактивации связанных с растениями патогенных организмов и лечения растений, зараженных грибом, а также сохранения урожая [13-18].

В настоящее время считается, что указанная активность ПАВ обусловлена действием химических веществ, в частности активных частиц кислорода и азота (RONS), а также сравнительно короткоживущих радикалов ($\bullet\text{OH}$, $\text{NO}\bullet$), супероксида (O_2^-), пероксинитрата (OONO_2^-) и пероксинитрита (ONOO^-) или перекиси водорода (H_2O_2) [9, 16, 19-22].

ПАВ считается экологичным и перспективным решением для биотехнологических примене-

ний из-за переходного характера его биохимической активности и потенциальных экономических и экологических преимуществ использования атмосферного воздуха, а не малодоступных или дорогих химических веществ в качестве исходного материала. Это потенциально может удешевить технологию обработки воды и водных растворов.

Перспективным способом получения ПАВ является непосредственное выделение активных частиц в объеме жидкости, в виде воздушного пузырька. Такой подход облегчает инициирование разряда, кроме того, пузырьковый разряд позволяет лучше перемешать образующиеся вещества и обеспечивает лучшую однородность при обработке жидкости. В этом случае подается импульсное напряжение, а тип частиц и их концентрация определяются типом плазмаобразующего газа [23]. Не менее важным является согласование параметров разряда с вариантами исполнения сопла, его ориентации и процессом образования пузырьков [21].

Техническим решением является устройство, в котором подача плазмообразующего газа осуществляется через трубку, погруженную в раствор. Внутри трубки помещается стержневой электрод, на который подаются импульсы напряжения. В этих условиях между внутренней стенкой трубки и электродом реализуется однобарьерный разряд, и образовавшиеся продукты плазмы немедленно поступают в раствор без каких-либо потерь на транспортировку. Эта схема, а также варианты ее реализации, были подробно описаны в обзорной статье [24].

Несмотря на большой объем данных, при изучении способов получения плазма-активированной воды необходимо учитывать факторы, которые не всегда попадают в поле зрения ученых. Тот или иной метод обработки может быть эффективным с точки зрения выхода химических продуктов, но при использовании в других условиях или применении иного водного образца результаты могут отличаться. Поэтому для создания технологии разрядной обработки воды требуются сравнительные исследования различных режимов обработки, одно из которых будет представлено в нашем материале.

Цель настоящей работы состоит в сравнении разных вариантов обработки водных образцов импульсными разрядами и влиянии образующихся активных частиц на воду с различным ионным составом.

Воздействие на воду и водные объекты осуществляли импульсным разрядом с помощью двух

вариантов высоковольтного электрода. Первый вариант предполагал зажигание разряда в воздушном пузыре при непосредственном контакте его с жидкостью и условно называется «пузырьковый». Второй вариант организован таким образом, что активные частицы образуются в потоке воздуха под действием барьерного разряда и после выдуваются в жидкость.

Выбор разряда обусловлен, во-первых, простотой в прикладных исследованиях [5, 14, 16, 17]. Во-вторых, оба варианта высоковольтного электрода конструктивно просто реализовать, что может в дальнейшем облегчить создание технологических установок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований использовали экспериментальную установку, показанную на рис. 1, а. Источник питания 1 обеспечивал импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой до 10 кВ, длительностью по основанию 1,3 мкс, фронтом 100 нс и частотой следования 54 кГц. Импульсы подавались на электрод 2, помещенный в стеклянную трубку 3, которая также соединялась с мембранным насосом 5. Нагнетаемый воздух через трубку 3 попадал в воду 4, налитую в кварцевый сосуд 6. Емкостную развязку между электродом 2 и землей обеспечивал фольговый электрод 7 (площадью 127 см²), размещенный на поверхности кварцевого сосуда, соединенный с емкостью 8 (КВИ 10 пФ, 20 кВ). Внутренний диаметр и высота сосуда 6 составляли 2 и 30 см, соответственно. Внешний и внутренний диаметр стеклянной трубки 3 составлял 7,5 и 5,5 мм, но в нижней части трубки имелось сужение с внутренним диаметром 0,8 мм. Объем воды в каждом эксперименте составлял 78 мл.

В экспериментах применяли два варианта сборки электродных узлов. В первом варианте (рис. 1, б) электрод 2 почти до самого конца помещался во фторопластовую трубку с толщиной стенки 0,5 мм так, чтобы разряд зажигался между концом электрода 2 и стенкой выдуваемых воздушных пузырей. В этом случае за время надувания пузыря на конце трубки 3, между его внутренней поверхностью и электродом может происходить несколько пробоев. Описанную сборку мы далее будем условно называть «пузырьковой». Она продуцирует химически активные частицы как непосредственно в разряде в воздухе, так и на поверхности раздела фаз «воздух – вода».

Второй вариант (рис. 1, в) использовали для обработки воды химически активными частицами,

образующимися в барьерном разряде. Для этого конец электрода имел открытый участок $x = 10$ см, а остальная часть была изолирована фторопластовой трубкой 9. На участке x при подаче напряжения на электрод 2 происходил т.н. барьерный разряд между электродом и стенкой. Образующиеся здесь химически активные частицы далее попадали в воду, насыщая ее и меняя ее характеристики.

Скорость прокачки воздуха (200 мл/мин) во всех опытах была фиксирована, чтобы сравнить производительность и состав полученных продуктов.

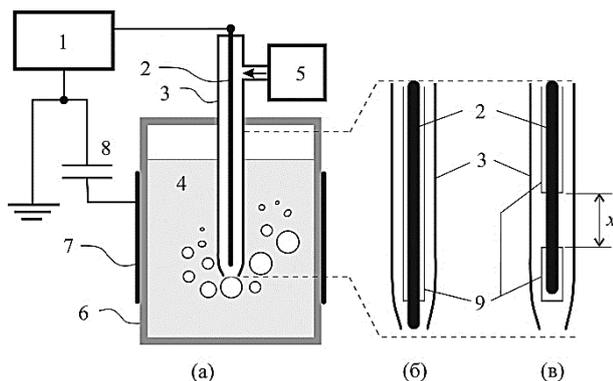


Рис. 1. Экспериментальная установка для обработки воды: 1 – источник питания; 2 – высоковольтный электрод; 3 – трубка для подачи воздуха; 4 – жидкость; 5 – насос; 6 – сосуд; 7 – фольга; 8 – емкость; 9 – изолирующий слой для высоковольтного электрода. а) общий вид установки; б) электрод с пузырьковым разрядом; в) электрод с барьерным разрядом
Fig. 1. Experimental setup for water treatment: 1 – power source, 2 – high voltage electrode, 3 – air tubing, 4 – liquid, 5 – pump, 6 – vessel, 7 – foil, 8 – capacitor, 9 – insulating layer for high voltage electrode. a) general view of the installation; б) an electrode with a bubble discharge; в) an electrode with a barrier discharge

Для контроля вводимой мощности использовали оценку нагрева воды в сосуде 6 за фиксированное время и далее, с учетом объема раствора рассчитывали выделенную в разряде тепловую энергию. Для измерения температуры воды использовали термодатчик, встроенный в тестер pH HI98108 («Hanna Instruments», Румыния) с точностью измерения температуры $\pm 0,5$ °C. Измерения одной пробы проводили три раза, а затем полученные величины усреднялись.

Обработке подвергали дистиллированную воду (ООО «Масла и смазки», Россия) с исходной проводимостью 0,2 мкСм/см, а также грунтовую воду, с исходной величиной проводимости 280 мкСм/см (о ее составе будет сказано ниже).

Определение ионного состава водных образцов осуществляли с помощью системы капиллярного электрофореза «Капель-105/105М» («Люмекс», Россия) со спектрофотометрическим детек-

тированием. В качестве диспергирующего элемента использовался дифракционный монохроматор со спектральным диапазоном от 190 до 380 нм. Сопутствующее методическое обеспечение позволяет анализировать различные анионы и катионы с пределом обнаружения 0,5 мкг/см³.

Водородный показатель (рН) водных образцов измерен потенциометрическим рН-метром «Иономер И-160МИ» («Измерительная техника», Россия), с использованием калибровочных буферных растворов. Электропроводность воды определяли с помощью лабораторного кондуктометра «АНИОН-4120» («Инфраспарк-Аналит», Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показано, как во времени происходит формирование анионов NO_3^- в различных условиях обработки. Считается, что образование анионов NO_3^- в водном растворе обеспечивается за счет превращения в разряде молекул азота и кислорода, имеющихся в воздухе. Их активация, конверсия и количество напрямую зависит от производительности используемого разряда. Видно, что пузырьковый разряд дает заметно большую производительность по указанным анионам в грунтовой воде, а в дистиллированной воде лучшая производительность обеспечивается барьерным разрядом.

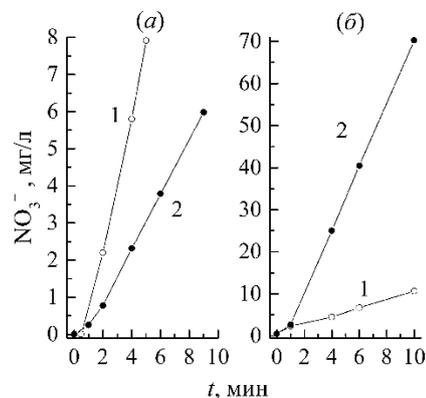


Рис. 2. Концентрация нитрат-анионов при обработке дистиллированной (а) и родниковой (б) воды барьерным (1) и пузырьковым (2) разрядами

Fig. 2. Concentration of nitrate anions in the case of treatment of distilled (a) and spring (b) waters by barrier (1) and bubble (2) discharges

Как эти данные соотносятся с энерговыделением в растворе? Обычно эту величину в газоразрядных приборах определяют с помощью построения осциллограмм тока и напряжения с последующим расчетом активной мощности. Но в нашем случае данный подход был неприменим по двум причинам:

Во-первых, за время формирования пузырька на конце трубки 3 (рис. 1(б)) происходит несколько пробоев промежутка между острием и внутренней поверхностью пузырька. Их количество может варьироваться – от единиц до сотен, что зависит от частоты следования импульсов напряжения и времени формирования пузырька. Поэтому энергозатрат для каждого из этих пробоев будет различным, что затрудняет статистический учет по отдельным осциллограммам.

Во-вторых, в обоих вариантах проведения обработки проводимость и температура раствора менялись, что также влекло за собой изменения в энерговыделении. Поэтому была сделана оценка количества теплоты, сообщенной жидкости разрядом за 10 мин обработки. При этом наша оценка не учитывала то, что теплота, сообщаемая разрядом раствору, также рассеивается на кварцевых стенках сосуда 6. Кроме того, мы не учитывали тот факт, что не вся энергия, сообщенная разрядом воде, далее была утилизирована в тепло (часть ее была потрачена на формирование химических соединений).

В табл. 1 приведены результаты расчетов тепловой мощности для четырех случаев, показанных на рис. 2. Видно, что в тех случаях, когда термализованная мощность выше, производительность разряда по нитрат-анионам максимальна. Причем в дистиллированной воде лучшую производительность обеспечивает обработка барьерным разрядом, а в грунтовой воде – пузырьковый разряд.

Таблица 1

Оценка термализованной в растворе мощности разряда (W) в зависимости от разряда и типа обрабатываемой воды дистиллированной (Д) или грунтовой (Г)

Table 1. Evaluation of the discharge power thermalized in the solution (W) depending on the discharge and the type of treated water, distilled (D) or ground (G)

Тип воды	W, Вт	
	Пузырьковый	Барьерный
Д	3,3 ± 0,5	4 ± 0,3
Г	11,1 ± 0,3	5,7 ± 0,4

При обработке дистиллированной воды обоими типами разрядов кислотность со временем снижается примерно от 7,5 до 3,5 pH, а проводимость растет от единиц до десятков мкСм/см. Иначе обстоит дело с обработкой грунтовой воды, что иллюстрирует рис. 3. Видно, что в обоих случаях значения pH увеличиваются с 8,1 до 8,6 pH. Наблюдается аномальный рост проводимости при

обработке барьерным разрядом за первые ~ 6 мин, а затем величина проводимости возвращается к исходной. Валидность этой аномалии подтверждается тем, что измерения проводимости осуществляли двумя инструментальными методами. И в обоих случаях она имело место. При обработке пузырьковым разрядом этого не происходит.

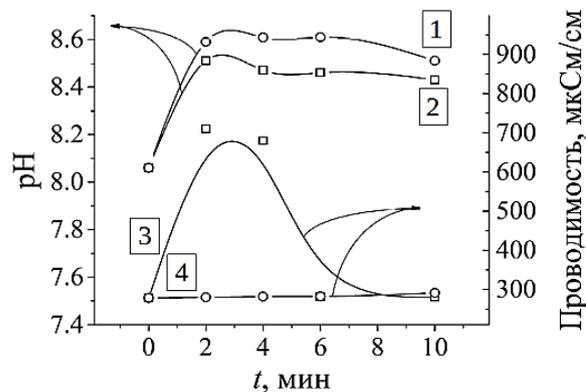


Рис. 3. pH и проводимость растворов, полученных при обработке родниковой воды барьерным (2, 3) и пузырьковым (1, 4) разрядами

Fig. 3. Conductivity and pH of solutions resulted from treatment of spring water by barrier (2, 3) and bubble (1, 4) discharges

В табл. 2 приведена концентрация ионов магния и кальция до и после обработки грунтовой воды разными разрядами. Видно, что воздействие разрядов приводит к существенному увеличению их концентрации в воде, увеличивая pH воды примерно с 8,1 до 8,5 после барьерного разряда или до 8,6 после пузырькового разряда (рис. 3).

Низкая концентрация ионов кальция и магния в исходном образце (табл. 2) и слабощелочная среда воды подразумевает присутствие в растворе ионов кальция и магния в виде нерастворимых солей, например, карбонатов кальция и магния. Известно [1, 8], что воздействие разряда на воздух в присутствии воды приводит к образованию различных активных частиц, в том числе анионов NO_3^- и NO_2^- , которые могут взаимодействовать с нерастворимыми в воде карбонатами. При этом образуются растворимые в воде соли – нитраты или нитриты кальция и магния, что и привело к росту концентрации в воде соответствующих катионов. Однако щелочная реакция раствора, сохраняющаяся на протяжении обработки воды барьерным разрядом, свидетельствует о том, что количество образовавшихся анионов NO_3^- и NO_2^- недостаточно для смещения равновесия до нейтральной или кислой реакции.

Таблица 2
Концентрация ионов (мг/л) до и после обработки
грунтовой воды в зависимости от типа разряда – пу-
зырьковый (ПР) и барьерный(БР)

Table 2. Ion concentration (mg/L) before and after
groundwater treatment versus the type of discharge:
bubble discharge (BD) or barrier discharge (DBD)

Время	Ионы	ПР	БР
Контроль	Mg ⁺⁺	0,05	
	Ca ⁺⁺	1,14	
10 мин	Mg ⁺⁺	9,69	9,79
	Ca ⁺⁺	66,43	42,71

Помимо ионов магния и кальция, в водных образцах отслеживались катионы калия и натрия. Обработка разрядами не оказывает существенного влияния на их концентрацию в воде, содержание катионов калия и натрия не изменяется на протяжении 10 мин воздействия и составляет 1,06 и 9,39 мг/л, соответственно. Карбонаты калия и натрия являются растворимыми солями и определяют первоначальную проводимость водного образца на уровне 280 мкСм/см, появление дополнительно анионов NO₃⁻ и NO₂⁻, в результате воздействия разряда, приводит к образованию нитратов калия и натрия, так же являющихся растворимыми солями.

Важно отметить, что очистка грунтовых вод также открывает путь к изучению относительно простых методов перевода солей (карбонатов кальция) из нерастворимой формы в растворимую. А именно, при взаимодействии с анионами NO₃⁻ нерастворимые карбонаты переходят в растворимые нитраты.

ВЫВОДЫ

Изученные способы получения плазма-активированной воды с помощью импульсного высоковольтного разряда в пузырьках и барьерного разряда в воздухе с последующим барботированием полученной смеси через воду обеспечивают высокие уровни насыщения растворов анионами NO₃⁻. Но максимальную производительность по указанным анионам дает пузырьковый разряд в грунтовой воде. При этом в раствор из сложных соединений, влияющих на жесткость воды, выделяется больше всего ионов Ca⁺⁺. Эти особенности процесса обработки воды с помощью импульсных разрядов следует учитывать при проектировании установок для масштабного получения ПАВ. Очевидно, что данный способ обработки с учетом требований к производительности установок является наиболее привлекательным в тех приложениях, где нужна вода с анионами NO₃⁻. Это – прежде всего гидропонные технологии выращивания растений

(см., например, [25]). Но с точки зрения энергозатрат на получение примерно равных количеств анионов NO₃⁻ (по порядку величины) подходят оба типа разрядной обработки, что согласуется с данными предшествующих работ [18].

Тем не менее, в будущем необходимо будет также выяснить влияние состава воды и типа разряда на продуцирование в ней других активных частиц, например, перекиси водорода. Такого рода исследование позволит доказательно решить вопрос о выборе условий обработки, таких, благодаря которым полученную ПАВ можно будет эффективно использовать как стерилизующий агент, например, для обработки поверхностей и воздуха помещений или фунгицидной обработки листьев растений в тепличных и полевых условиях.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят Д.В. Печеницына за помощь в настройке высоковольтных источников питания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWRN-2021-0003).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors would like to thank D.V. Pechenitsyn for help in tuning of high-voltage power supplies.

The work was supported by funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FWRN-2021-0003).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Kornev J., Yavorovsky N., Preis S.** Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water-air mixtures. *Ozone: Sci. Eng.* 2006. V. 28. P. 207–215. DOI: 10.1080/01919510600704957.
2. **Malik M.A.** Water Purification by Plasmas: Which Reactors are Most Energy Efficient? *Plasma Chem. Plasma Process.* 2010. V. 30. P. 21–31. DOI: 10.1007/s11090-009-9202-2.
3. **Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R.** Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. 25. 053002. DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/053002.
4. **Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C.** Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. In: *Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions.* InTech. 2016. P. 429–478. DOI: 10.5772/61830.
5. **Mouele E.S.M., Tijani J.O., Badmus K.O.** Removal of Pharmaceutical Residues from Water and wastewater using Dielectric Barrier Discharge Methods – A Review. *Int. J. Environ.*

- Res. Public Health*. 2021. V. 18 (4). 1683. DOI: 10.3390/ijerph18041683.
6. **Гусев Г.И., Гушин А.А., Гриневич В.И., Извекова Т.В., Шаронов А.В., Рыбкин В.В.** Обработка сточных вод, содержащих 2,4-дихлорофенол, в плазме диэлектрического барьерного разряда. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 88-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6182.
 - Gusev G.I., Gushchin A.A., Grinevich V.I., Izvekova T.V., Sharonov A.V., Rybkin V.V.** Treatment of wastewater containing 2,4-dichlorophenol in a dielectric barrier discharge plasma. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 88-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6182.
 7. **Манукян А.С., Сейоум М.Б., Рыбкин В.В.** Разложение органических красителей в их водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 4-12. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6339.
 - Manukyan A., Seyoum M.B., Rybkin V.V.** Decomposition of organic dyes in their aqueous solutions under the action of electrical discharges of atmospheric pressure. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 4-12. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6339.
 8. **Zeghioud H., Nguyen-Tri P., Khezami L., Amrane A., Assadi A.A.** Review on discharge Plasma for water treatment: Mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. *J. Water Process Eng.* 2020. V. 38. 101664. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101664.
 9. **Zhou R., Zhou R., Wang P.** Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2020. V. 53. 303001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab81cf.
 10. **Xu D., Wang S., Li B., Qi M.** Effects of plasma-activated water on skin wound healing in mice. *Microorganisms*. 2020. V. 8. 1091. DOI: 10.3390/microorganisms8071091.
 11. **Hozak P., Scholtz V., Khun J., Mertova D., Vankova E., Julak J.** Further Contribution to the Chemistry of Plasma-Activated Water: Influence on Bacteria in Planktonic and Biofilm Forms. *Plasma Phys.* 2018. 44. P. 799–804. DOI: 10.1134/S0367292118090044.
 12. **Chiappim W., Sampaio AdG., Miranda F.** Antimicrobial Effect of Plasma-Activated Tap Water on Staphylococcus aureus, Escherichia coli, and Candida albicans. *Water*. 2021. 13 (11). 1480. DOI: 10.3390/w13111480.
 13. **Perez S.M., Biondi E., Laurita R., Proto M., Sarti F., Gherardi M., Bertaccini A., Colombo V.** Plasma activated water as resistance inducer against bacterial leaf spot of tomato. *PLoS ONE*. 2019. V. 14 (5). e0217788. DOI: 10.1371/journal.pone.0217788.
 14. **Dimitrakellis P., Giannoglou M., Xanthou Z.M., Gogolides E., Taoukis P., Katsaros G.** Application of plasma-activated water as an antimicrobial washing agent of fresh leafy produce. *Plasma Process Polym.* 2021. e2100030. DOI: 10.1002/ppap.202100030.
 15. **Naumova I.K., Subbotkina I.N., Titov V.A., Khlyustova A.V., Sirotkin N.A.** Effect of water activated by non-equilibrium gas-discharge plasma on the germination and early growth of cucumbers (*Cucumis sativus*). *Appl. Phys.* 2021. V. 4. P. 40–46. DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-40-46.
 16. **Thirumadasa R., Kothakot A., Annapure U., Siliveru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidisgh V.P.** Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends Food Sci. Technol.* 2018. V. 77(7). P. 21–31. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.05.007.
 17. **Гушин А.А., Гриневич В.И., Квиткова Е.Ю., Гусев Г.И., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Рыбкин В.В.** Газовые разряды как инструмент очистки газовых и растворных сред и синтеза неорганических материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 120-131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
 - Gushchin A.A., Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Gusev G.I., Shutov D.A., Ivanov A.N., Manukyan A.S., Rybkin V.V.** Gas discharges as a tool for the purification of gas and solution gases for the synthesis of inorganic materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 120-131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
 18. **Herianto S., Hou C.-Y., Lin Ch.-M., Chen H.-L.** Nonthermal plasma-activated water: A comprehensive review of this new tool for enhanced food safety and quality. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2021. V. 20(1). P. 583–626. DOI: 10.1111/1541-4337.12667.
 19. **Cao Y., Qu G., Li T., Jiang N., Wang T.** Review on reactive species in water treatment using electrical discharge plasma: formation, measurement, mechanisms and mass transfer. *Plasma Sci. Technol.* 2018. V. 20. 103001. DOI: 10.1088/2058-6272/aacff4.
 20. **Brisset J.L., Pawlat J.** Chemical Effects of Air Plasma Species on Aqueous Solutes in Direct and Delayed Exposure Modes: Discharge, Post-discharge and Plasma Activated Water. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. V. 36. P. 355–381. DOI: 10.1007/s11090-015-9653-6.
 21. **Tarabová B., Lukeš P., Hammer M.U., Jablonowski H., von Woedtke T., Reuter S., Machala Z.** Fluorescence measurements of peroxynitrite/peroxynitrous acid in cold air plasma treated aqueous solutions. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019. V. 21. P. 8883–8896. DOI: 10.1039/C9CP00871C.
 22. **Tang Q., Lin S., Jiang W., Lim T.M.** Gas phase dielectric barrier discharge induced reactive species degradation of 2,4-dinitrophenol. *Chem. Eng. J.* 2009. V. 153. P. 94–100. DOI: 10.1016/j.cej.2009.06.022.
 23. **Sun B., Sato M., Clements S.J.** Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water. *J. Electrostat.* 1997. V. 39. P. 189–202. DOI: 10.1016/S0304-3886(97)00002-8.
 24. **Mouele E.S.M., Tijani J.O., Badmus K.O., Perea O.** A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. V. 9. P. 105758. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105758.
 25. **Takahata J., Takai K., Satta N., Takahashi K., Fujio T.** Improvement of growth rate of plants by bubble discharge in water. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2015. V. 54. 01AG07. DOI: 10.7567/JJAP.54.01AG07.

Поступила в редакцию (Received) 04.05.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 14.11.2023