

## АКТИВАЦИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОИСКРОВОГО КОЛЬЦЕВОГО РАЗРЯДА С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В РАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

© 2023 г. В. В. Гудкова<sup>a,b</sup>, Д. А. Разволяева<sup>a,b,\*</sup>, И. В. Моряков<sup>a</sup>, А. М. Анпилов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

\*e-mail: darzylv@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 17.06.2023 г.

Принята к публикации 25.06.2023 г.

Представлены результаты исследований образования активных форм кислорода и азота в деионизированной воде Milli-Q® (электрическая проводимость  $\leq 0.1$  мкСм/см) под действием многоискрового импульсного разряда с инъекцией газа в межэлектродное пространство. Разряд представляет собой совокупность микроплазменных образований в многофазной среде, для которых был оценен удельный энергозатрат. Проанализировано влияние инжектируемых газов (аргон, воздух) на образование плазменного разряда в межэлектродном пространстве и долгоживущих химических соединений: пероксида водорода, нитрит-ионов и нитрат-ионов. Изменение длительности воздействия на воду от 2 до 10 минут приводит к изменению ее химического состава и электропроводящих свойств, но практически не сказывается на характеристиках и длительности пробойной стадии разряда. При этом регистрировалось изменение концентраций пероксида водорода, нитрит-ионов и нитрат-ионов в течение одного часа после завершения плазменного воздействия. Обнаружено распыление электродов из нержавеющей стали, которое составило около 1 мг/минуту и приводило в ряде случаев к выпадению нерастворимого осадка. Полученные данные позволят провести оптимизацию воздействия активированной плазмой жидкости на растения и посадочный материал.

*Ключевые слова:* многоискровой разряд, разряд в многофазной среде, активные формы кислорода и азота, пероксид водорода, нитрит ионы, нитрат ионы, плазменно-активированная жидкость

DOI: 10.31857/S0367292123600553, EDN: EQIOQU

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы выполнено множество работ по взаимодействию плазмы и жидкости [1]. Данное междисциплинарное направление включает в себя физику плазмы, гидродинамику, теплообмен, фотолиз. Плазможидкостное взаимодействие многообразно, сопровождается сложными физико-химическими процессами. Способы генерации низкотемпературной плазмы атмосферного давления с помощью газовых разрядов [2, 3] вызывают все больший интерес благодаря широкому спектру прикладных задач, требующих образования активных форм кислорода и азота (АФК и АФА), в медицине и биологии [4–7], сельском хозяйстве [8–12], пищевой промышленности [13, 14] и экологии [15]. Плазма при контакте с жидкостью в зависимости от параметров источника питания и рабочего газа может быть источником соединений, которые являются сильными окислителями (радикалы, пероксид

водорода, окислы азота и многих других), а также наночастиц и иных комплексов.

Для решения указанных выше вопросов используют разрядные системы, которые, условно, можно разделить на три типа: разряд формируется непосредственно в жидкости, разряд реализуется над поверхностью жидкости (в эту категорию также можно отнести системы, в которых одним из электродов является жидкость) и многофазные системы – разряд возникает в газовых пузырьках, струях газа в жидкости, аэрозолях, пенообразующих жидкостях [1]. При этом в данных системах применяются различные источники питания: импульсно-периодические, ВЧ, СВЧ [16–23].

Особое внимание привлекают технические решения с возможностью воздействия на большой объем жидкости. Исследование образования АФК и АФА под действием импульсного высоковольтного электрического разряда вдоль границы жидкость–газ важно для объяснения протекающих реакций. Специфика разрядов с погружен-

ными в жидкость электродами состоит в образовании газовых пузырьков по объему жидкости, при этом образуется многофазная система [24].

Развитие импульсного электрического разряда в жидкости приводит к образованию в ней микропузырьков [25]. Радикалы, образующиеся в плазме в пузырьках, взаимодействуют с химическими компонентами в жидкости путем переноса через границу раздела газ–жидкость. Таким образом, более эффективное образование АФК и АФА в жидкостях может быть получено путем инъекции газа вблизи электродов. Это способствует образованию внутрипузырьковой плазмы в области, усиленной электрическим полем [26]. Реакция образования пероксида водорода за счет рекомбинации двух гидроксильных радикалов  $\text{OH}\cdot$  может происходить в газе, жидкости и на границе раздела двух сред [1].

Рассматриваемая в работе кольцевая импульсно-периодическая многоэлектродная искровая разрядная система [27] с максимальной суммарной мощностью до 1000 Вт с инъекцией газа в межэлектродных промежутках позволяет эффективно воздействовать на сравнительно большой объем водного раствора (до 600 мл). Особенности протекания разряда зависят в том числе и от условий его формирования: вид инжектируемого газа и приложенное напряжение. Эрозия электродов, вызванная высокой температурой искрового канала и, как следствие, катодным распылением, приводит к образованию однородных коллоидных растворов  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , либо выпадению наночастиц в осадок в зависимости от условий эксперимента (времени воздействия, рабочего газа) [28, 29]. Образование наночастиц материала электрода может быть полезно в сельскохозяйственных приложениях в зависимости от индивидуальных особенностей выращиваемых культур [30, 31].

Сложность протекающего процесса требует экспериментального установления зависимости концентраций образующихся соединений кислорода и азота в зависимости от времени воздействия, материала электродов и рабочего газа. Хотя используемая в представляемой работе разрядная система [27] с инъекцией газа в межэлектродное пространство и ее вариации [32–34] уже применялись для решения ряда прикладных задач, однако подробные измерения концентраций АФК и АФА с помощью зондовых методов и спектродетекции с использованием жидких счетных растворов ранее не проводились.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

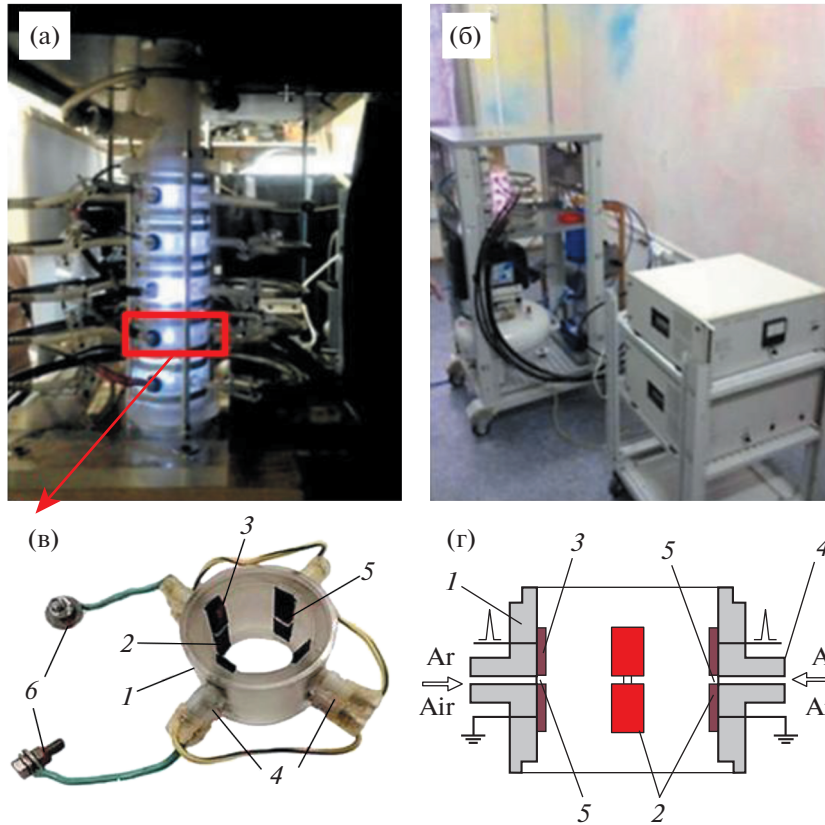
На рис. 1 приведена фотография и схема установки. Установка состоит из пяти последовательно соединенных реакторных камер, к каждой из которых подведен один канал источника пита-

ния. Объем одной камеры составлял  $120 \text{ см}^3$ . На внутренней стенке диэлектрической трубы из оргстекла 1 крепились металлические электроды 2 размерами  $8 \times 14 \times 2 \text{ мм}$  (в качестве материала использовалась пищевая нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т и сплав алюминия Д16). Поверхность электродов обращена к центру трубы и покрыта полимерным электроизоляционным материалом 3. Система позволяет работать как в стационарном режиме, так и с прокачкой жидкости. В промежуток между электродами через специальные патрубки 4 инжектируется газ (например, аргон или воздух). Диаметр отверстия 5  $d \leq 1 \text{ мм}$ . К клеммам 6 подавалось высоковольтное напряжение. Зазор между электродами составлял 2 мм. Расположение разрядных промежутков симметрично по кольцу, обеспечивает “фокусировку” УФ-излучения и гидродинамических возмущений.

Питание системы осуществлялось импульсным генератором  $U_n \leq 20 \text{ кВ}$  с накопительной емкостью  $C = 10^{-8} \text{ Ф}$  с тиратронной схемой запуска. Параметры источника питания в эксперименте: амплитуда импульсного тока  $I \leq 250 \text{ А}$ , частота следования импульсов  $f = 50 \text{ Гц}$ , энергия накопительного конденсатора  $W = 1.6 \text{ Дж}$ . Суммарная мощность установки составляла 400 Вт, мощность каждого канала – 80 Вт. Реакторная камера заполнялась деионизированной водой Milli-Q® с электрической проводимостью  $\leq 0.1 \text{ мкСм/см}$  до начала работы установки. В промежуток между электродами инжектировался либо аргон, либо воздух со скоростью 2 л/мин.

Для измерения напряжения и тока использовались делитель напряжения 1 : 1000 (Tektronix P6015A), и пояс Роговского 1 : 10 (Stangenes Industries). Сигналы подавались на вход двухлучевого осциллографа (Tektronix TDS 1002B). Спектры свечения разряда регистрировались с помощью спектрографа Ava Spec 3648FT. При измерении электрической проводимости воды использовались кондуктометры HANNA DIST-5 HI 98308 и HANNA DIST-5 HI 98312.

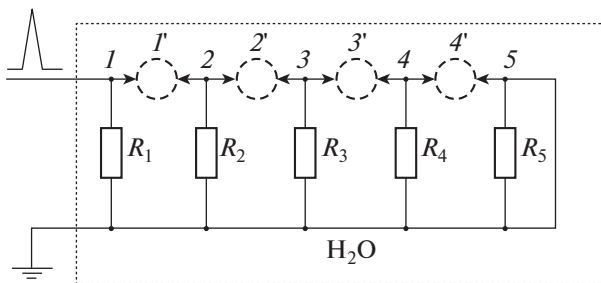
На рис. 2 схематически представлена эквивалентная электрическая схема реакторной камеры. Система работает по принципу скользящего разряда. Эквивалентные сопротивления – это сопротивления воды между соответствующими электродами и заземленным электродом. Высокое значение сопротивления воды обеспечивает развитие скользящего разряда – последовательный пробой разрядных промежутков. Наличие границы трёх сред – газ–металл–вода ( $\epsilon = 81$ ) снижает порог электрического пробоя, который формируется вдоль границы вода–газ. Для высоковольтного импульсного разряда с длительностью импульса около 1 мкс требуется достаточно высокая крутизна нарастания импульса напряже-



**Рис. 1.** а) – Фотография реактора в работе; б) – установка, в) – одна из секций реактора; г) – сечение разрядной камеры. 1 – диэлектрическая камера, 2 – электроды, 3 – электроизоляционный материал, 4 – патрубок для инъекции газа в отверстие 5, 6 – клеммы для подачи ВВ напряжения.

ния. При достижении высокой проводимости жидкости в процессе обработки значительная часть энергии импульса будет застрачиваться на нагрев жидкости до пробоя. Предлагаемая схема организации разряда позволяет значительно нивелировать этот эффект.

На рис. 3 представлены временные зависимости тока и напряжения, где 1 и 2 – времена предпробойной и “канальной” стадий искрового раз-

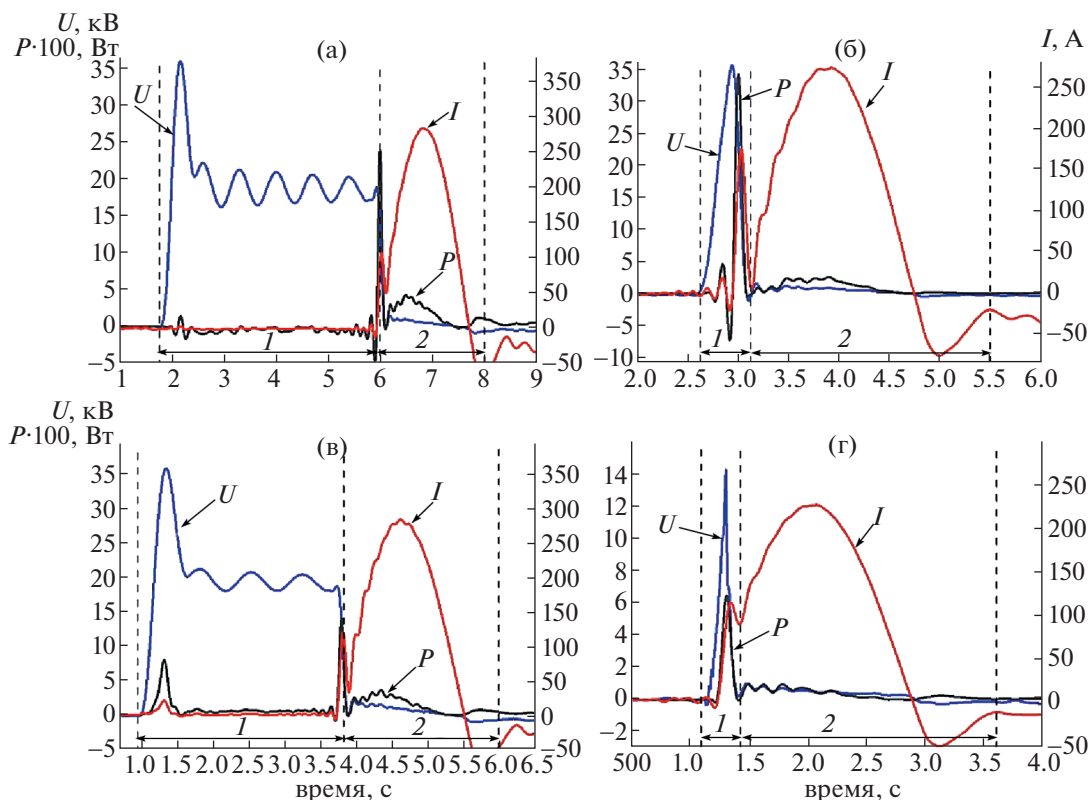


**Рис. 2.** Эквивалентная электрическая схема реакторной камеры, где 1–5 – электроды, 1'–4' – газовые полости, R<sub>1</sub>–R<sub>5</sub> – эквивалентные сопротивления между электродами и землей.

ряда соответственно. Согласно оценкам, сделанным на основе приведенных осциллограмм, в предпробойную и канальную стадии разряда вкладывается приблизительно равная энергия в 0.25 Дж. При этом вклад энергии в разряд практически не менялся в процессе эксперимента. Формирование искрового канала (стадия 1) начинается с задержкой от 0.5 мкс до 4 мкс и сопровождается резким падением напряжения и ростом разрядного тока (стадия 2). При общей длине всех разрядных промежутков  $L = 8$  мм, диаметре искрового канала  $d \leq (2-3) \times 10^{-2}$  см и энерговкладе в искровой канал  $E = 0.5$  Дж, удельный энерговклад составляет около  $1 \text{ кДж/см}^3$  [32–34].

При подаче на разрядник высоковольтного импульса в межэлектродном пространстве в пузырьках газа, содержащих пары воды, формируются высокотемпературные искровые каналы, характеризующиеся следующими параметрами: газовая температура 4000–5000 К, температура электронов 1.0–1.5 эВ [32–34].

Рассмотрим некоторые характерные особенности взаимодействия плазмы и жидкости, которые реализованы в предлагаемой системе. Воздействие импульсного высоковольтного разряда



**Рис. 3.** Типичные временные зависимости тока и напряжения разрядной системы и рассчитанная по ним мощность, где а), б) – осциллограммы, полученные при инъекции воздуха в межэлектродное пространство, до начала и после 10 минут обработки жидкости разрядом соответственно; в), г) – осциллограммы, полученные при инъекции аргона в межэлектродное пространство, до начала и после 10 минут обработки жидкости разрядом соответственно.

на воду и водные растворы сосредоточено преимущественно в области плазменных каналов и обусловлено воздействием гидратированных электронов, ионов и активных радикалов ( $O^{\bullet}$ ,  $OH^{\bullet}$  и др., зона действия  $\leq 10$  мм). Также воздействие оказывают волновые процессы – механические (акустические, ударные волны) и электромагнитные – УФ-излучение. Эти процессы оказывают как прямое воздействие, так и фотолитическое, при этом воздействие УФ приводит к генерации активных радикалов на глубину проникновения УФ-излучения в воду до 40 мм. Возможно также развитие кавитационных явлений, действие которых также может оказывать влияние на изучаемые процессы.

Время обработки жидкости составляло от 2 до 10 минут. Под действием разряда вода приобретает оранжевый оттенок (в случае использования электродов из нержавеющей стали). С одинаковым интервалом в 10 минут с момента получения обработанного образца проводились измерения концентрации образовавшихся в жидкости веществ (пероксида водорода, нитрит- и нитрат-ионов), водородного показателя среды pH, окис-

лительно-восстановительного потенциала RedOx и электрической проводимости.

На рис. 4 приведен спектр свечения разрядной системы из более ранней работы [32] (условия эксперимента идентичны настоящей работе). В спектрах выделяются линии аргона  $Ag(I)$ , железа  $Fe(I)$  (300–460 нм), триплет кислорода (777 нм) и линии водорода  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ . Наличие линий железа в спектре доказывает эрозию стальных электродов, что достаточно важно для настоящей работы и сельскохозяйственных приложений. Концентрация электронов, определенная в [32] по уширению линии водорода  $H_{\alpha}$ , связанному с эффектом Штарка в электрическом поле плазмы, составляет  $N_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

### 3. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Объектом исследования в данной работе была деонизированная вода Milli-Q® (вода 1 типа согласно ГОСТ 52501-2001 “Вода для лабораторного анализа”). Диагностика образующихся АФК и АФА осуществлялась с помощью спектрофотометрии (спектрофотометр Cintra 4040, разрешение 0.1 нм) с использованием жидких зондов: для

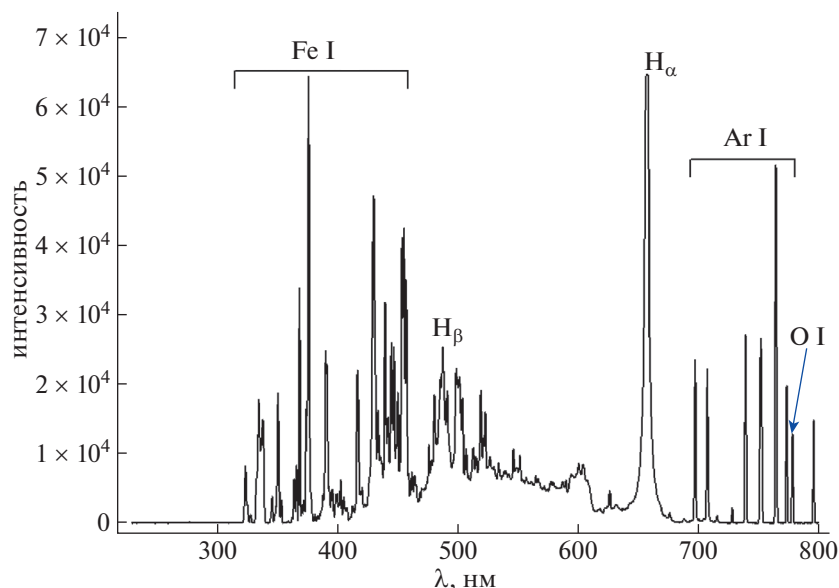


Рис. 4. Интегральный спектр излучения в пузырьках газа в жидкости.

измерения концентраций пероксида водорода использовался реактив FOX [35], для измерения нитрит-ионов—реактив на основе порошка Грисса [36]. Также с помощью плоского ионоселективного электрода LAQUAtwin проводилась оценка образующихся нитрат-ионов, pH и RedOx растворов измерялись потенциометрическим методом. Измерения концентраций АФК и АФА осуществлялись при различной продолжительности плазменного воздействия (0, 2, 4, 6, 8, 10 мин). Концентрация пероксида водорода измерялась по оптической плотности на длине волны 560 нм в растворе спустя 5 минут после добавления реактива ferrous oxidation in xylenol orange (FOX) по пику, соответствующему окислению двухвалентного железа в красителе до  $Fe^{3+}$ . Концентрация нитрит-ионов измерялась по оптической плотности на длине волны 525 нм спустя 20 мин после добавления реактива Грисса по реакции нитрования красителя. Возможное влияние нитрит-ионов на правильность измерения пероксида водорода методом FOX не оценивалось.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось ранее, для ряда сельскохозяйственных задач необходимо образование АФК и АФА: пероксид водорода помогает бороться с патогенными микроорганизмами, ускоряет прорастание семян, нитрит- и нитрат-ионы могут служить питательными веществами для дальнейшего роста семян, результатом чего выступает увеличение урожая [37–39].

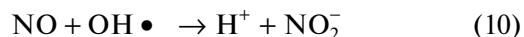
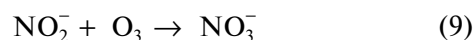
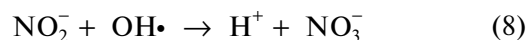
В образование пероксида водорода вносят свой вклад гидроксильные радикалы, источни-

ком кислорода для которых является воздух. Процессы описываются следующими реакциями:



Эксперимент показал, что концентрация пероксида водорода растет с увеличением времени воздействия разряда на жидкость с инъекцией обоих газов (рис. 5). При инъекции аргона концентрация пероксида водорода выше, чем при инъекции воздуха. Этот эффект можно объяснить тем, что при инъекции аргона в жидкости образуется на порядок меньшее количество нитрит-ионов, которое способствует деградации пероксида водорода согласно (7).

Известно, что газовые разряды атмосферного давления могут являться эффективным источником окислов азота [40–42]. Главными источниками окислов азота в жидкости в проведенном эксперименте являются окислы азота, образующиеся из газовой фазы:



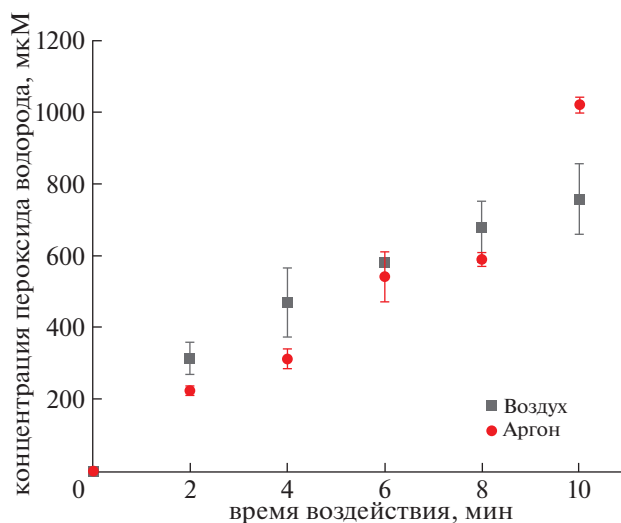


Рис. 5. Зависимость концентрации пероксида водорода от времени воздействия многоискрового разряда.

Под действием низкотемпературной плазмы атомы азота окисляются, образуя оксиды азота, нитрит- и нитрат-ионы (рис. 6). Измерения показали, что концентрация нитрит-ионов в жидкости при инъекции воздуха растет вплоть до 8 мин, после чего концентрация падает.

Необходимо измерять концентрации АФК и АФА в растворе не только сразу после обработки воды, но и спустя значительное время, поскольку большинство плазменно-активированных водных растворов транспортируют на сельскохозяйственное производство, где непосредственно происходит полив растений. Концентрация нитрат-ионов (рис. 6б) максимальна при длительности обработки 10 минут. Установлено, что для выхода концентрации нитрат-ионов на плато требу-

ется в среднем двое суток спустя время после завершения электроразрядной обработки.

Электрическая проводимость жидкости в эксперименте линейно увеличивалась со временем воздействия от начального значения 0.1 мкСм/см, достигая при 10 минутах обработки значения 250 мкСм/см. Однако такое изменение не приводило к существенному изменению пробойной стадии разряда (рис. 3), а именно в ней и происходит основное энерговыделение. Наш опыт предыдущих исследований показывает, что существенные изменения пробойной стадии разряда начинают наблюдаться при электрической проводимости порядка 1 мСм/см. Также можно отметить, что в процессе воздействия разряда на жидкость, часть энергии расходуется на ее нагрев. В то же время за счет барботации происходит охлаждение жидкости. При этом нагрев жидкости зависит от типа инжектируемого газа. Так при использовании аргона вода нагревается с 21°С до 35°С, воздуха – до 41°С. Разница связана прежде всего с кратным ростом электрической проводимости воды при использовании воздуха.

Водородный показатель среды – количественная характеристика кислотности водных растворов, влияющая на доступность питательных веществ для растений. При инъекции аргона кислотность деионизированной воды зафиксирована в пределах 5; при инъекции воздуха – с увеличением длительности воздействия плазмы понижалась с 5 до 3.5 (табл. 1). Установлено, что кислотность среды сохраняется при инъекции аргона из-за отсутствия окислов азота: они не оказывают должного влияния, поскольку главным источником их образования в жидкости является воздух.

Как отмечалось ранее, вследствие эрозии электродов в растворе наблюдается образование микро- и наночастиц металлов, что является преимуществом для использования такой жидкости

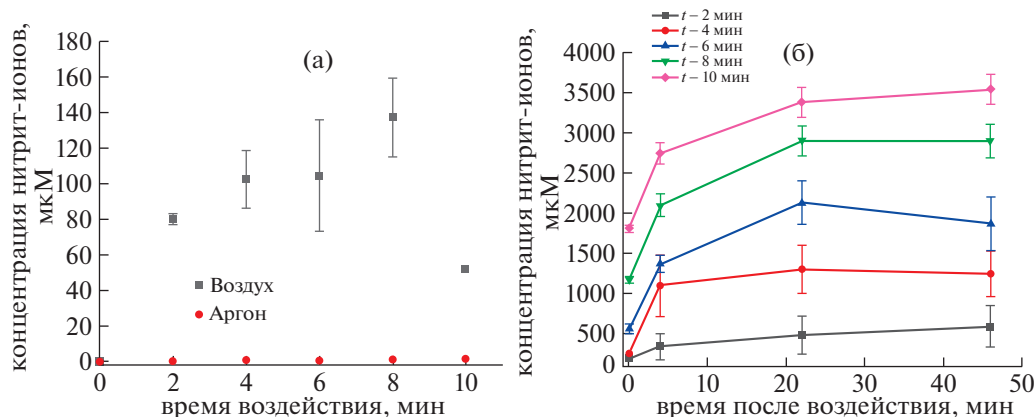


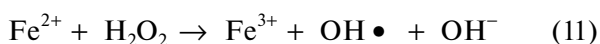
Рис. 6. Концентрация окислов азота при инъекции воздуха; а) – в зависимости от времени воздействия; б) – после прекращения воздействия.

**Таблица 1.** Зависимость водородного показателя среды pH и окислительно-восстановительного потенциала RedOx от времени воздействия многоискровым разрядом

Время воздействия, мин	Эксперимент с инъекцией воздуха		Эксперимент с инъекцией аргона	
	pH	RedOx, мВ	pH	RedOx, мВ
0	5.7	434	5.7	434
2	5.3	404	5.3	401
4	3.8	515	5.3	395
6	3.6	527	5.4	387
8	3.5	535	5.5	421
10	3.3	539	5.6	423

в сельскохозяйственной отрасли. Существует множество исследований, посвященных влиянию наночастиц на всхожесть и рост растений [43, 44]. Выбор материала электрода дает возможность для обогащения растений полезными веществами. В предлагаемой работе использовались электроды из нержавеющей стали: влияние наночастиц железа в малых концентрациях позволит ускорить рост побегов [45]. В полученной активированной плазмой жидкости содержатся ионы железа, поэтому важно оценить их концентрацию. Используемый метод определения концентрации пероксида водорода основывается на реакции Фентона. Наиболее важными элементами реакции Фентона являются переходные металлы, такие как железо и медь, которые способны катализировать образование гидроксильного радикала путем взаимодействия с пероксидом водорода. Таким образом, реакция Фентона может быть проведена в присутствии переходных металлов. Эффективность реакции Фентона зависит от различных условий, таких как pH, температура, концентрация реагентов, что может значительно ограничить ее применение в ряде ситуаций.

Для установления корректности полученных результатов измерений концентраций пероксида водорода было необходимо измерить концентрации образовавшихся ионов  $Fe^{2+}$ , которые, окисляясь, способны вносить вклад в измерения концентраций пероксида водорода, участвуя в реакции:



Понижение концентрации ионов железа в эксперименте с инъекцией аргона при длительности воздействия разряда 8 и 10 минут соответствует наблюдаемому перенасыщенному коллоидному раствору: частицы выпадают в осадок, образуя конгломераты. Было установлено, что при указанных параметрах источника питания распыление электродов из нержавеющей стали составило около 1 мг/минуту, что согласуется с измеренными концентрациями с помощью жидкого зонда.

Полученные концентрации ионов железа дают пренебрежимо малый вклад в измеряемые концентрации АФК (табл. 2).

Активированная низкотемпературной плазмой вода уже показала свое положительное влияние на рост и развитие растений. Так в [46] показано, что обработка водного раствора в течение 3, 6, 9, 12, 15 минут высоковольтным разрядом (3–6 кВ, 3–10 кГц) приводит к образованию концентраций  $H_2O_2$  до 250 мкМ и  $NO_2^-$  до 8.7 мкМ. Использование обработанной воды дало значительное улучшение в прорастании семян *Vigna mungo* и более длинные побеги и корни по сравнению с необработанными образцами. Генерация плазмы с помощью диэлектрического барьерного разряда (14 кГц, 5.85 Вт) [47] приводит к образованию в воде концентраций  $H_2O_2$  (20 минут обработки) 200 мкМ; окислов азота (20 минут обработки) порядка 750 мкМ. Использование этих растворов приводило к увеличению длины проростков *Raphanus sativus L.* в 1.62 раза по сравнению с контролем. Также при обработке жидкостей регулярно используются разряды с помещенным электродом в воду и плазменные струи [48].

**Таблица 2.** Зависимость концентрации ионов железа  $Fe^{3+}$  от времени воздействия многоискровым разрядом (М – моль/л)

Время воздействия, мин	Эксперимент при инъекции воздуха Концентрация $Fe^{3+}$ , мкМ	Эксперимент при инъекции аргона Концентрация $Fe^{3+}$ , мкМ
2	23.5	21.3
4	29.9	37.8
6	44.2	72.5
8	71.9	24.4
10	116.6	37.7

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании воздействия многоискрового импульсного разряда на границе газ–жидкость одним из важных параметров является инжектируемый газ, влияющий как на параметры разряда, так и на образование в жидкости химических соединений.

В предлагаемой системе эффект от воздействия активных соединений возрастает в результате того, что в процессе развития разряда внутри газового пузыря возникают акустические волны, способствующие появлению пузырей и интенсификации процесса перемешивания жидкости [49]. Также при формировании разряда в жидкости и газе у границы раздела фаз возникает многофазная область, состоящая из газа, жидкости, плазмы, паров воды. В этой области интенсифицируются процессы обмена. Свой вклад в эти процессы может вносить барботация жидкости. Комплексное воздействие способствует повышению эффективности плазможидкостного взаимодействия.

Результаты проведенного эксперимента по обработке деонизированной воды многоискровым источником плазмы подтверждают, что при использовании воздуха в качестве рабочего газа наблюдается активное образование окислов азота (нитриты до 140 мкМ, нитраты до 1.9 мМ). После окончания воздействия наблюдается окисление нитрит-ионов до нитрат-ионов.

При инъекции аргона наблюдается более активная эрозия электродов, как следствие, при обработке в течение 8 и 10 минут в жидкостях сразу после воздействия появляется осадок частиц  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Появление в воде железа в целом не влияет на правильность измерения пероксида водорода методом FOX, но может влиять на фактическое значение концентрации пероксида, например, через протекание реакции Фентона (разложение пероксида водорода переходными металлами с образованием радикалов). Поэтому в последующих работах необходимо исследовать изменение концентрации пероксида водорода в жидкости спустя время после завершения воздействия разрядом и роль распыленного материала электродов в этом процессе.

Экспериментальные результаты показывают, что под действием многоискрового кольцевого разряда с инъекцией газа (воздух, аргон) в жидкости образуются активные формы кислорода и азота. И их концентрация достаточна для того, чтобы рассматривать полученные растворы в качестве стимуляторов всхожести и роста растений. Стоит отметить, что используемый источник достаточно энергоэкономичен, поскольку для активации 1 литра воды при максимальной длительности воздействия разрядом (10 минут) в среднем расходуется 130 Вт·час.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному коллективу Отдела физики плазмы ИОФ РАН Борзосекову В.Д., Бережецкой Н.К. и сотруднику Центра биофотоники ИОФ РАН Кончехову Е.М. за рекомендации при подготовке эксперимента и плодотворное обсуждение результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeners 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., Krcma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E.C., Pawlat J., Lj Petrovic Z., Pflieger R., Reuter S., Schram D.C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P.A., Verlet J.R.R., von Woedtke T., Wilson K.R., Yasui K., Zvereva G. // Plasma Sources Science and Technology. 2016. P. 1. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
2. Bruggeman P.J., Iza F., Brandenburg R. // Plasma Sources Science and Technology. 2017. V. 26. № 12. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa97af>
3. Artem'ev K.V., Bogachev N.N., Gusein-zade N.G., Dolmatov T.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Andreev S.E. // Russian Physics Journal. 2020. V. 62. P. 2073. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01948-1>
4. Pavlik T., Gudkova V., Razvolyaeva D., Pavlova M., Kostukova N., Miloykovich L., Kolik L., Konchekov E., Shimanovskii N. // IJMS. 2023. V. 24. P. 1. <https://doi.org/10.3390/ijms24065100>
5. Akopdzhanov A.G., Sveshnikova E.D., Guseyn-zade N.G., Kolik L.V., Konchekov E.M., Shimanovskiy N.L. // Pharmaceutical Chemistry Journal. 2021. V. 55. P. 11. <https://doi.org/10.1007/s11094-021-02363-7>
6. Konchekov E.M., Gusein-Zade N.G., Kolik L.V., Artem'ev K.V., Pulish A.V. // In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing. 2020. V. 848. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012037>
7. Akopdzhanov A.G., Shimanovskii N.L., Stepanova D.S., Fedotcheva T.A., Pulish A.V., Gusein-zade N.G., Kolik L.V., Konchekov E.M. // Biophysics (Russian Federation). 2019. V. 64. P. 926. <https://doi.org/10.1134/S0006350919060034>
8. Kuzin A., Solovchenko A., Khort D., Filippov R., Lukina V., Lukina N., Astashev M., Konchekov E. // Plants. 2023. V. 12. P. 385. <https://doi.org/10.3390/plants12020385>
9. Ashurov M.Kh., Ashurov E.M., Astashev M.E., Baimler I.V., Gudkov S.V., Konchekov E.M., Lednev V.N., Lukina N.A., Matveeva T.A., Markendudis A.G., Onegov A.V., Rashidova D.K., Sarimov R.M., Sergeichev K.F., Sharipov S.T., Simakin A.V., Smirnov I.G., Smolentsev S.Y., Yakubov M.M., Yanykin D.V., Shcherbakov I.A. // ChemEngineering 2022. V. 6. P. 91. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6060091>

10. *Konchekov E.M., Kolik L.V., Danilejko Y.K., Belov S.V., Artem'ev K.V., Astashev M.E., Pavlik T.I., Lukanin V.I., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Gudkov S.V.* // *Plants* (Basel). 2022. V. 11. P. 1373.  
<https://doi.org/10.3390/plants11101373>
11. *Konchekov E.M., Glinushkin A.P., Kalinitchenko V.P., Artem'ev K.V., Burmistrov D.E., Kozlov V.A., Kolik L.V.* // *Frontiers in Physics*. 2021. V. 8.  
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.616385>
12. *Astashev M.E., Konchekov E.M., Kolik L.V., Gudkov S.V.* // *Sensors* 2022. V. 22. 8310.  
<https://doi.org/10.3390/s22218310>
13. *Belov S.V., Danileiko Y.K., Egorov A.B., Lukanin V.I., Semenova A.A., Lisitsyn A.B., Revutskaya N.M., Nasonova V.V., Yushina Y.K., Tolordava E.R., Nasyrov N.A., Sinichkina A.I., Konchekov E.M., Matveeva T.A., Gudkov S.V.* // *Processes*. 2022. V. 10. P. 1536.  
<https://doi.org/10.3390/pr10081536>
14. *Takaki K., Takahashi K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T.* // *Reviews of Modern Plasma Physics*. 2021. V. 5. № 12.  
<https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>
15. *Smirnov B.M., Babaeva N.Y., Naidis G.V., Panov V.A., Son E.E., Tereshonok D.V.* // *Bubble Method of Water Purification*. High Temp. 2019. V. 57. P. 286–288.  
<https://doi.org/10.1134/S0018151X19020202>
16. *Bruggeman P., Leys C.* // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2009. V. 42. P. 1.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>
17. *Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutso A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.-P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U., Mason N.* // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 1.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001>
18. *Лебедев Ю.А.* // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 6. С. 685.  
<https://doi.org/10.7868/S0367292117060105>
19. *Babaeva N.Yu., Berry R.S., Najdis G.V., Smirnov B.M., Son É.E., Tereshonok D.V.* // *High Temperature*. 2016. № 54. P. 745.  
<https://doi.org/10.7868/S0040364416050057>
20. *Akishev Yu.S., Grushin M.E., Karal'nik V.B., Monich A.E., Pan'kin M.V., Trushkin N.I., Kholodenko V.P., Chugunov V.A., Zhirkova N.A., Irkhina I.A., Kobzev E.N.* // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. № 12. С. 1142.  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
21. *Akishev Yu.S., Grushin M., Karal'nik V., Trushkin N., Kholodenko V., Chugunov V., Kobzev E., Zhirkova N., Irkhina I., Kireev G.* // *Pure Appl. Chem.* 2008. V. 80. № 9. P. 1953.  
<https://doi.org/10.1351/pac200880091953>
22. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Бережецкая Н.К., Грицинин С.И., Давыдов А.М., Козлов Ю.Н., Косский И.А., Мисакян М.А., Темчин С.М., Ральченко В.Г., Гуцин П.А., Иванов Е.В.* // *ЖТФ*. 2011. Т. 81. С. 48.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784211110028>
23. *Barkhudarov E.M., Kossyi I.A., Kozlov Yu.N., Temchin S.M., Taktakishvili M.I., Christofi N.* // *Journal of Atomic and Molecular Physics*. 2013. P. 12.  
<https://doi.org/10.1155/2013/429189>
24. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Bark Yu.B., Zadira-ka Yu.V., Christofi M., Kozlov Yu.N., Kossyi I.A., Kop'ev V.A., Silakov V.P., Taktakishvili M.I., Temchin S.M.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 993.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/6/322>
25. *Panov V.A., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Pecherkin V.Ya., Saveliev A.S.* // *Plasma Phys. Rep.* 44, 882–885 (2018).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X1809009X>
26. *Babaeva N.Yu., Kushner M.J.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. V. 42.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/13/132003>
27. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Двоенко А.В., Козлов Ю.Н., Косский И.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Темчин С.М.* // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 3. С. 265–271.
28. *Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F.* *Pulsed Gas Lasers*. Washington: SPIE Press, 1995.
29. *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* *Физика импульсного пробоя газов*. М.: Наука, 1991.
30. *Iqbal T.* // *International Journal of Plant Research*. 2017. V. 30. P. 93–100.  
<https://doi.org/10.5958/2229-4473.2017.00042.8>
31. *Panakkal H., Gupta I., Bhagat R., Ingle A.P.* // *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection*. 2021. P. 259.  
<https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch13>
32. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косский И.А., Мисакян М.А., Моряков И.В., Смирнов М.Г., Тактакишвили И.М.* // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 5. С. 772.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.05.50688.311-20>
33. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Козлов Ю.Н., Косский И.А., Мисакян М.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Тарасова Н.М., Темчин С.М.* // *Физика плазмы*. 2019. Т. 45. № 3. С. 268.  
<https://doi.org/10.1134/S036729211902001X>
34. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Гусейн-заде Н.Г.О., Косский И.А., Мисакян М.А., Моряков И.В., Смирнов М.Г., Тактакишвили М.И., Темчин С.М.* *Устройство для плазмохимической обработки жидкостей*. Патент на полезную модель 201546 U1, 21.12.2020.
35. *Wolff. S.P.* // *Methods in Enzymology*. 1994. V. 233. P. 182.  
[https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(94\)33021-2](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(94)33021-2)
36. *Tsikas D.* // *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*. 2007. V. 851. P. 51.  
<https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2006.07.054>
37. *Shin R., Schachtman D.P.* // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004. V. 101. P. 8827.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0401707101>
38. *Belov S.V., Danyleiko Y.K., Glinushkin A.P., Kalinitchenko V.P., Egorov A.V., Sidorov V.A., Konchekov E.M., Gudkov S.V., Dorokhov A.S., Lobachevsky Y.P., Izmailov A.Yu.* // *Frontiers in Physics*. 2021. V. 8.  
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.618320>
39. *Chen B., Wang Z., Li S.-X., Wang G.-X., Song H., Wang X.* // *Plant Science*. 2004. V. 167.  
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.05.011>
40. *Kossyi I.A., Kostynsky A.Y., Matveyev A.A., Silakov V.P.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. V. 1. P. 207.  
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/3/011>

41. *Shakhatov V.A., Gritsinin S.I., Borzosekov V.D.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 5. С. 441.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292121050085>
42. *Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Gritsinin S.I., Davydov A.M., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Lebedev Y.A., Moryakov I.V., Petrov A.E., Sarksyun K.A., Stepakhin V.D., Kharchev N.K., Shakhatov V.A.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 3. С. 264.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292120030014>
43. *Ahmad A., Hashmi S., Palma J., Corpa F.* // Chemosphere. 2022. V. 290.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133329>
44. *Adhikari T., Kundu S., Rao A.S.* // Int. J. Agric. Food Sci. Technol. 2013. V. 4. P. 809.
45. *Shah V., Belozeroва I.* // Water Air Soil Pollut. 2009. V. 197. P. 143.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-008-9797-6>
46. *Sajib S.A., Billah M., Mahmud S., Miah M., Hossain F., Omar F.B., Roy N.C., Hoque K.M.F., Talukder M.R., Kabir A.H., Reza M.A.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2020. V. 40. P. 119.  
<https://doi.org/10.1007/s11090-019-10028-3>
47. *Sarinont T., Katayama R., Wada Y., Koga K., Shiratani M.* // MRS Adv. 2017. V. 2. P. 995.  
<https://doi.org/10.1557/adv.2017.178>
48. *Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M.* // Processes. 2020. V. 8. P. 1002.  
<https://doi.org/10.3390/pr8081002>
49. *Шмелев В. М., Анпилов А.М., Бархударов Э.М.* // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 55–59.