

УДК 533.9.07

## ПОЛУЧЕНИЕ ЧИСТЫХ РАСТВОРОВ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА ПРИ АКТИВАЦИИ ВОДЫ ПЛАЗМОЙ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ-РАЗРЯДА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОСТОМ РАСТЕНИЙ

С. Н. Андреев<sup>1,\*</sup>, Л. М. Апашева<sup>2</sup>, М. Х. Ашуров<sup>3</sup>, Н. А. Лукина<sup>1</sup>, Б. Сапаев<sup>4</sup>,  
И. Б. Сапаев<sup>4</sup>, К. Ф. Сергейчев<sup>1</sup>, академик РАН И. А. Щербаков<sup>1</sup>

Поступило 20.12.2018 г.

Разработан метод получения чистых растворов пероксида водорода при активации воды плазмой безэлектродного СВЧ-разряда. Показано, что активированная вода обладает выраженным действием на сельскохозяйственные растения, являясь нетоксичным и химически чистым регулятором биологической активности. В частности, с помощью обработки семян сельскохозяйственных растений растворами активированной воды можно повысить их засухоустойчивость.

*Ключевые слова:* пероксид водорода, СВЧ-разряд, активированная вода, биологическая активность.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863297-300>

Известно, что пероксид водорода  $H_2O_2$  в водных растворах с малой концентрацией является нетоксичным, экологически безопасным регулятором роста растений [1, 2]. В частности, пероксид водорода может стимулировать образование крахмала и хлорофилла в процессе фотосинтеза высших растений, повышать стойкость растений при засухе и заморозках. Обработка растворами пероксида водорода почвогрунтов или растений в период вегетации может быть наиболее щадящим методом стимулирования роста, сохраняющим жизнеспособность почвенной микрофлоры. Продукты распада чистого пероксида водорода — вода и кислород — не оставляют в почве посторонних веществ.

При объяснении механизма рострегулирующего действия  $H_2O_2$  как молекулы, относящейся к классу активных форм кислорода (АФК), следует обратить внимание на новейшие биохимические исследования, касающиеся водных каналов клеточных плазматических мембран и белков, регулирующих их проницаемость — аквапоринов. В работе [3] было

установлено, что при воздействии на клетки корней проростков кукурузы малыми концентрациями АФК повышалась проницаемость водных каналов клеточных плазматических мембран для воды, а при воздействии более высокими дозами АФК она снижалась.

Однако степень стимулирующего влияния водных растворов пероксида водорода в зависимости от его концентрации в растворе на различные растения ещё не исследована в необходимой мере.

Задача наших исследований состояла в создании нового способа получения активированной воды, содержащей пероксид водорода, под воздействием плазмы и излучения свободного безэлектродного сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда в струе плазмообразующего газа (аргона) и изучении предпосевного воздействия активированной воды на лабораторную всхожесть семян сельскохозяйственных растений.

Устройство используемого плазмотрона для решения поставленной задачи представлено на рис. 1. Источником энергии факельного СВЧ-плазмотрона служит магнетрон бытовых микроволновых печей (частота 2,45 ГГц, длина волны 12,24 см, мощность  $\leq 900$  Вт), используемый в режиме непрерывной генерации. Волна низшего типа  $TE_{10}$  возбуждается антенной магнетрона в прямоугольном волноводе сечением  $45 \times 90$  мм, которая затем преобразуется в волну  $TEM$  коаксиального волновода. Цент-

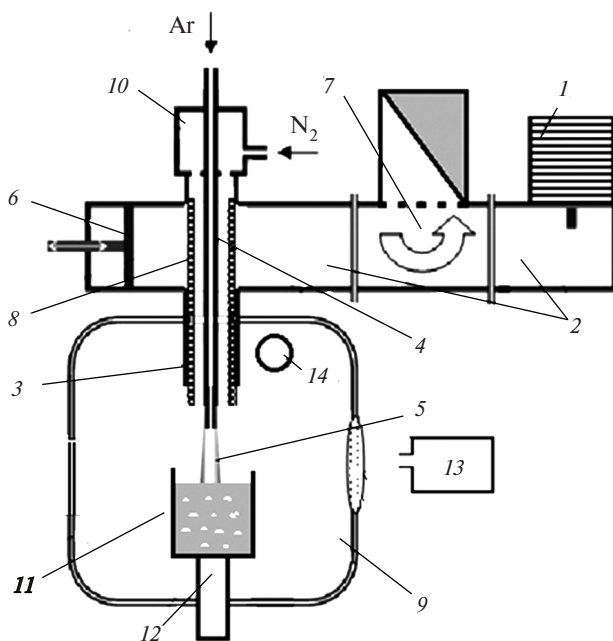
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семенова  
Российской Академии наук, Москва

<sup>3</sup>Государственное научно-производственное предприятие  
“Фонон”, Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>4</sup>Ташкентский государственный аграрный университет,  
Республика Узбекистан

\*E-mail: nauka@gpi.ru



**Рис. 1.** Схема плазмотрона: 1 — магнетрон; 2 — прямоугольный волновод; 3 — коаксиальный волновод, 4 — медная трубка; 5 — плазменный факел; 6 — поршень для подстройки СВЧ-тракта; 7 — циркулятор; 8 — кварцевая трубка; 9 — камера реактора; 10 — смеситель; 11 — ёмкость с водой; 12 — подвижный шток; 13 — спектрометр; 14 — выпускной патрубок.

ральный проводник коаксиального волновода, представляющий собой медную трубку с наружным диаметром 6 мм, заканчивается узким соплом с отверстием диаметром 1,5 мм. Струя плазмообразующего газа (аргона), вытекающая из сопла при давлении в камере  $p \geq 1$  атм с относительно высокими скоростями потока (расход аргона составляет 3–5 л в минуту стандартной атмосферы) в результате ионизации под действием СВЧ-поля превращается в плазменный факел.

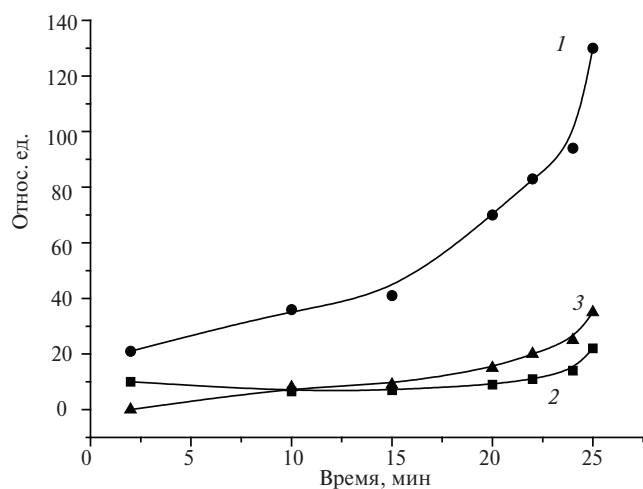
Настройка согласования преобразователя волн поршнем используется для эффективной передачи СВЧ-мощности от магнетрона в разряд. Защита магнетрона от отражённой назад волны при погасании факела обеспечивается циркулятором с поглощающей нагрузкой. Коаксиальная часть плазмотрона герметично изолирована от прямоугольного волновода радиопрозрачной кварцевой трубкой. Плазмотрон помещён в камеру из нержавеющей стали для биологической защиты от СВЧ-излучения плазменного факела и для изоляции внутреннего объёма реактора от окружающего воздуха. Через смеситель по трубке в камеру могут избирательно подаваться молекулярные газы воздух, азот или кислород, которые в присутствии плазмы могут вступать в химические реакции с водой и её паром.

Плазма факела оторвана от сопла потоком вытекающей струи аргона, направленная скорость истечения которой на выходе из сопла оказывается больше скорости распространения фронта ионизации, движущегося в факеле навстречу соплу. Поэтому сопло не греется, что позволяет данный тип факельного разряда считать безэлектродным. СВЧ-мощность из коаксиального волновода транслируется в факел благодаря ёмкостной связи между соплом и плазмой факела.

Отработавшие газы и частично водяной пар благодаря небольшому избыточному давлению вытекают в вытяжную химическую вентиляцию через выпускной патрубок. Расходы газов измеряются поплавковыми расходомерами на выходе баллонных редукторов DINFLOW N10-3-30. Обработанная вода в сосуде из термостойкого стекла или кварца помещается на подвижном штоке, который при перемещении вверх приводит воду в соприкосновение с факелом. Давление струи формирует на поверхности воды каверну, в которой под действием высокотемпературного плазменного факела происходит испарение воды. Взаимодействие пара с плазмой приводит к образованию перекиси водорода.

Для мониторинга режимов плазменного разряда по оптическим эмиссионным спектрам в экспериментах используются монохроматоры в диапазоне длин волн 300–1000 нм с различным разрешением: спектрометр FSD-8 с разрешением 10 нм и AvaSpec-3648-USB2 с разрешением 0,3 нм. FSD-8 служит для мониторинга эмиссионного спектра плазменного факела. Изображение плазменного факела проецируется на входные щели сменяемых спектральных приборов.

Взаимодействие с водой плазмы аргона с температурой, достигающей 4000 К и содержащей высокую концентрацию метастабильно возбуждённых атомов  $Ar^*$  с энергией 11,5–11,7 эВ и временем жизни больше 1,3 секунды, способно активировать химические реакции с водой с образованием атомарных кислорода и водорода, озон-гидроксильной смеси радикалов  $[OH]$ ,  $[HO_2]$  и  $O_3$  с последующим их преобразованием в пероксид водорода  $H_2O_2$ . На рис. 2 показано изменение относительной интенсивности линий эмиссионного спектра атомарных водорода и кислорода в зависимости от времени воздействия плазменного факела на воду. Из рисунка видно, что концентрации атомарных H и O в плазме реактора существенно возрастают со временем, что можно объяснить накоплением в камере молекулярных гидроксила OH и пероксида  $H_2O_2$ , а также газов  $O_2$ ,  $H_2$ , которые не вступают между собой в реакции



**Рис. 2.** Зависимость относительных спектральных интенсивностей атомарных линий водорода  $H_{\alpha}$  (1),  $H_{\beta}$  (2) и кислорода O (3) от продолжительности плазменной обработки воды.

в среде водяного пара, играющего роль флегматизатора.

Измерение количества пероксида водорода в активированной воде при её хранении в течение 10 суток проводилось йодометрическим методом [4]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Тест-объектами для определения рострегулирующего действия активированной воды были следующие сельскохозяйственные растения, представители разных видов: пшеница сорт Альбиум, редис сорт Жара, огурец сорт Вязниковский, маш сорт Дурдона. Семена замачивали в разбавленных растворах активированной воды с различной концентрацией пероксида водорода (опыт), а также в дистиллированной воде (контроль) в чашках Петри. Чашки помещали в термостат с температурой  $+22^{\circ}\text{C}$ . В ходе тестирования рост-регулирующего действия активированной воды на растения учитывалось изменение ряда морфологических признаков.

Во всех случаях поведение тест-объектов, обработанных активированной водой с различными концентрациями пероксида водорода, существенно отличалось от результатов контрольного опыта.

**Таблица 1.** Количество перекиси водорода в активированной воде, моль/л

Время хранения, сутки			
1	5	7	10
$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Существует область больших концентраций пероксида водорода, при которой наблюдается полное подавление биологической активности исследуемых объектов, область концентраций, при которых влияние пероксида водорода места не имеет, и область концентраций, при которой достигается стимулирующий эффект.

Например, семена редиса сорт Жара замачивали в чашках Петри: контроль — в дистиллированной воде, опыт 1 — в растворе активированной воды без разведения, что соответствует концентрации пероксида водорода  $n = 3 \cdot 10^{-3}$  моль/литр, опыт 2 — в растворе с концентрацией пероксида водорода  $n = 3 \cdot 10^{-4}$  моль/л, опыт 3 — в растворе с концентрацией пероксида водорода  $n = 3 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Через 20 ч культивирования семян в термостате получено, что количество семян с длиной корня больше или равной 2 мм в контроле было 15%, в опыте 1 не было живых семян, в опыте 2 их было 15%, в опыте 3 было 45%. На 4-е сутки оценивалось количество растений с раскрытым семядольным листом. Их было в контроле 15%, в опыте 1 не было, в опыте 2 — 10%, в опыте 3 — 40%.

Семена маша сорт Дурдона замачивались в течение 20 ч в чашках Петри: контроль — в дистиллированной воде, опыт 1 — в растворе активированной воды с концентрацией пероксида водорода  $n = 3 \cdot 10^{-5}$  моль/л, опыт 2 — в растворе с концентрацией пероксида водорода  $n = 3 \cdot 10^{-6}$  моль/л. На 5-е сутки оценивалась средняя высота стебля растений с раскрытым семядольным листом. В контроле средняя максимальная высота составила 0,5 см, в опыте 1 она была 10,2 см, в опыте 2 — 8 см. В одном из экспериментов проверялась засухоустойчивость маша, семена которого замачивали в течение 20 ч в растворе с концентрацией  $n = 3 \cdot 10^{-5}$  моль/л (опыт) и дистиллированной воде (контроль). После прорастания маша в грунте в течение 5 дней, растения были оставлены на 20 дней без полива. В результате в контроле выжило 10% растений, а в опыте 90%. Тем самым засухоустойчивость маша можно повысить с помощью обработки семян растворами активированной воды.

Подобные результаты были получены и для других сельскохозяйственных культур, перечисленных выше.

По результатам опытов определена концентрация пероксида водорода в активированной воде  $n = 3 \cdot 10^{-5}$  моль/л, при которой в наших экспериментах достигается максимальный стимулирующий эффект. Отметим, что при использовании водных растворов коммерчески доступного пероксида во-

дорода равной концентрации подобная закономерность не наблюдалась, вероятно, из-за наличия в растворе дополнительных стабилизирующих химических соединений, отрицательно влияющих на всхожесть семян.

Таким образом, разработан метод получения чистых растворов пероксида водорода при активации воды плазмой безэлектродного СВЧ-разряда. Показано, что активированная вода обладает выраженным действием на сельскохозяйственные растения, являясь нетоксичным и химически чистым регулятором биологической активности. Дальнейшие исследования по оптимизации технологии и совершенствованию оборудования позволят создать мобиль-

ные установки для получения и применения активированной воды в полевых условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзинников Ю.С. // Вестн. РАСХН. 1997. № 2. С. 44–47.
2. Апашева Л.М., Комиссаров Г.Г. // Изв. РАН. Сер. биол. 1996. № 5. С. 621–623.
3. Velikanov G.A., Sibgatullin T.A., Belova L.P., Ionenko I.F. // *Protoplasma*. 2015. V. 252. P. 1263–1273.
4. Лобанов А.В., Рубцова Н.А., Веденеева Ю.А., Комиссаров Г.Г. // ДАН. 2008. Т. 421. № 6. С. 773–776.

## THE PRODUCTION OF PURE HYDROGEN PEROXIDE SOLUTIONS IN WATER ACTIVATED BY PLASMA OF THE ELECTRODELESS MICROWAVE DISCHARGE AND THEIR APPLICATION TO CONTROL PLANT GROWTH

S. N. Andreev<sup>1</sup>, L. M. Apasheva<sup>2</sup>, M. Kh. Ashurov<sup>3</sup>, N. A. Lukina<sup>1</sup>, B. Sapaev<sup>4</sup>, I. B. Sapaev<sup>4</sup>, K. F. Sergeichev<sup>1</sup>, Academician of the RAS I. A. Shcherbakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup>*“FONON”, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

<sup>4</sup>*Tashkent State Agrarian University, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

Received December 20, 2018

A plasma method for producing pure solutions of hydrogen peroxide during activation of water by plasma of electrodeless microwave discharge has been developed. It is shown that the activated water has a pronounced effect on agricultural plants, being non-toxic and chemically pure regulator of biological activity. In particular, the treatment of seeds of agricultural plants with activated water solutions can improve their drought resistance.

*Keywords:* hydrogen peroxide, microwave discharge, activated water, biological activity.