

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:*

DOI: <https://doi.org/>

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 почво-грунтов 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

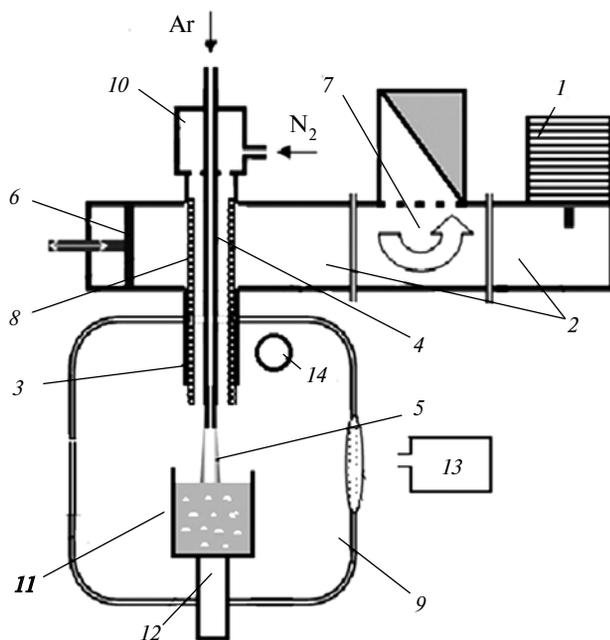
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской Академии наук, Москва

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

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

<sup>4</sup>Ташкентский государственный аграрный университет

\*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 — емкость с водой; 12 — подвижный шток; 13 — спектрометр; 14 — выпускной патрубок.

сечением  $45 \times 90 \text{ мм}^2$ , которая затем преобразуется в волну *TEM* коаксиального волновода. Центральный 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 отраженной назад волны при погасании факела обеспечивается циркулятором с поглощающей нагрузкой. Коаксиальная часть плазмотрона герметично изолирована от прямоугольного волновода радио-прозрачной кварцевой трубкой. Плазмотрон помещён в камеру из нержавеющей стали для биологической защиты от СВЧ-излучения плазменного факела и для изоляции внутреннего объема реактора от окружающего воздуха. Через смеситель по трубке в камеру могут избирательно подаваться молекулярные газы воздух, азот или кислород, ко-

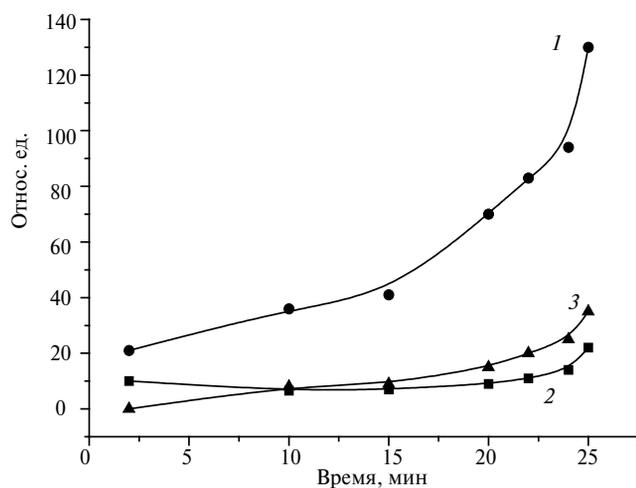
торые в присутствии плазмы могут вступать в химические реакции с водой и её паром.

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. Обрабатываемая вода в сосуде из термоупорного 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 возбужденных атомов  $\text{Ar}^*$  с энергией 11,5–11,7 эВ и временем жизни  $> 1,3$  секунды, способно активировать химические реакции с водой с образованием атомарных кислорода и водорода, озон-гидроксильной смеси радикалов  $[\text{OH}]$ ,  $[\text{HO}_2]$  и  $\text{O}_3$  с последующим их преобразованием в пероксид водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ . 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



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

гидроксила  $OH$  и пероксида  $H_2O_2$ , а также газов  $O_2$ ,  $H_2$ , которые не вступают между собой в реакции в среде водяного пара, играющего роль флегматизатора.

Измерение количества пероксида водорода в активированной воде при ее 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  $+22\text{ }^{\circ}C$ . 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, существенным

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

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

образом отличалось от результатов контрольного опыта.

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 было 10%, в опыте 3 было 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 была 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 прорастивания 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 экспери-

ментах достигается максимальный стимулирующий эффект. Отметим, что при использовании водных растворов коммерчески доступного пероксида водорода 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 иссле-

дования по оптимизации технологии и совершенствованию оборудования позволят создать мобильные 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, L. M. Apasheva, M. Kh. Ashurov, N. A. Lukina, B. Sapaev, I. B. Sapaev, K. F. Sergeichev, academician I. A. Shcherbakov

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:*