

**Влияние воды, активированной неравновесной газоразрядной плазмой, на всхожесть и ранний рост огурцов (*Cucumis sativus*)***И. К. Наумова, И. Н. Субботкина, В. А. Титов, А. В. Хлюстова, Н. А. Сироткин*

*Представлены результаты плазмохимической обработки воды и исследования ее влияния на всхожесть семян огурцов, а также на динамику начального роста растений. Водопроводную воду обрабатывали импульсным подводным разрядом, формирующимся в парогазовых пузырьках у поверхности погруженного в воду графитового электрода. Разряд горел при амплитудных значениях напряжения 800 В и тока разряда 200 мА. Получены осциллограммы тока и напряжения на электродах, измерены значения удельной электропроводности воды, значения рН, концентрации нитрит- и нитрат-ионов, а также пероксида водорода в обработанной воде. Показано, что использование воды после плазмохимической обработки повышает всхожесть семян, ускоряет развитие корневой системы, рост стебля и листьев на ранних стадиях развития растений.*

*Ключевые слова:* плазма, импульсный подводный разряд, плазменно-активированная вода, активные частицы, семена, всхожесть.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-40-46

**Введение**

Процессы взаимодействия неравновесной плазмы с водой и растворами электролитов интенсивно исследуются в связи с решением различных прикладных задач. Среди этих задач – уничтожение болезнетворных микроорганизмов в воде и ее очистка от токсичных и вредных органических загрязнений [1–4], модифицирование поверхности синте-

тических и натуральных полимерных материалов [5, 6], получение ультрадисперсных порошков металлов и оксидов [8, 9], применение активированной плазмой воды («plasma activated water», PAW) в сельском хозяйстве и в пищевой промышленности [10–12]. Повышенная химическая и биохимическая активность PAW обусловлена образованием активных кислород- и азотсодержащих частиц (атомов О, Н, радикалов ОН, НО<sub>2</sub>, молекул озона, пероксида водорода, нитрат- и нитрит-ионов, пероксинитритов), а также изменением физико-химических свойств воды (электропроводности, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала) [13].

Найдено, что использование PAW улучшает всхожесть семян и ускоряет развитие растений. Улучшение всхожести показано для семян редьки [14], ячменя [15, 16], фасоли золотистой (бобов мунг) [17], сои [18], семенного картофеля [19], чечевицы [20], ржи и циннии однолетней [21]. Ускоренный рост шпината, редиса и клубники при поливе водой, обработанной плазмой, отмечен в работе [22]. Было установлено, что использование

**Наумова Ирина Константиновна**<sup>1</sup>, зав. кафедрой, к.х.н.

E-mail: irinauma@mail.ru

**Субботкина Ирина Николаевна**<sup>1</sup>, доцент, к.х.н.

**Титов Валерий Александрович**<sup>2</sup>, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: titov25@gmail.com

**Хлюстова Анна Владимировна**<sup>2</sup>, н.с., к.х.н.

**Сироткин Николай Александрович**<sup>2</sup>, н.с., к.х.н.

<sup>1</sup> Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д. К. Беляева.

Россия, 153012, г. Иваново, ул. Советская, 45.

<sup>2</sup> Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН.

Россия, 153045, г. Иваново, ул. Академическая, 1.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2021 г.

© Наумова И. К., Субботкина И. Н., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., 2021

PAW в разной степени влияет на скорость роста различных растений (редис, перец, томаты, бобы, цинния) [23]. При этом было найдено, что изменения в составе воды после плазменной обработки зависят не только от типа использованного разряда, но и от начального состава воды (использовалась как водопроводная, так и родниковая вода).

Цель данной работы – исследование влияния воды, обработанной действием плазмы подводного импульсного разряда, на лабораторную и грунтовую всхожесть семян огурцов сорта «Зозуля», а также на динамику развития растений на ранних стадиях.

### Методики экспериментов

Схема экспериментальной ячейки для возбуждения разряда показана на рис. 1, установка подробно описана в [24]. Разряд возбуждали, подавая переменное напряжение ( $U \leq 2$  кВ,  $f = 50$  Гц) на графитовые электроды диаметром 6 мм, которые были заключены в стеклянные трубки и погружены в раствор, как показано на рис. 1. Ток замыкался через торцы электродов, не закрытые стеклом. Разряд квазипериодически возникал в парогазовых пузырьках, формирующихся за счет электрохимических процессов и перегрева жидкости у торцевой поверхности электрода, а также в пузырьках воздуха, который с помощью насоса подавался в зону горения разряда через тонкий стеклянный капилляр. Объемный расход воздуха не контролировали. Осциллограммы напряжения  $U(t)$ , тока  $i(t)$ , а также интенсивности излучения разряда  $I(t)$ , полученные с использованием цифрового осциллографа OWON PDS 5022C и многоканального аналого-цифрового преобразователя «Measurement minilab 1008», использовали для определения амплитудных и средних значений тока и напряжения горения разряда, а также для расчета рассеиваемой в ячейке

$$\text{мощности: } \langle P \rangle = (1/T) \int_t^{t+T} U(t)i(t)dt .$$

В экспериментах использовали водопроводную воду, которую обрабатывали при амплитудных значениях напряжения на электродах около 800 В и тока 200 мА в течение 5–30 минут. Объем воды в ячейке был 500 мл, ее начальная температура была комнатной, а

после обработки достигала 95 °С. Обработанную воду, охлажденную до комнатной температуры, использовали для проращивания семян перед посевом и полива почвы в период роста растений.

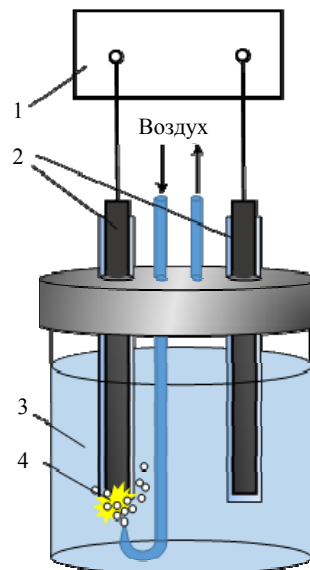


Рис. 1. Схема установки: 1 – источник питания; 2 – графитовые электроды в стеклянных трубках; 3 – вода; 4 – зона плазмы.

Удельную электропроводность воды измеряли кондуктометром Анион 4100, величину рН и концентрации нитрит- и нитрат ионов – иономером И-160МИ. Для определения концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  использовали ион-селективные электроды «Элит-021», а ионов  $\text{NO}_2^-$  – «Элит-071». Концентрацию пероксида водорода в обработанной плазмой воде определяли иодометрическим титрованием [25].

Всхожесть семян исследовали по методикам, приведенным в [26]. Для определения лабораторной всхожести семена проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге, увлажненной водой после газоразрядной обработки. Семена выдерживали при комнатной температуре ( $20 \pm 2$  °С) в течение 8 суток, смачивая бумагу водой каждые сутки. В контрольных экспериментах семена проращивали аналогично, но использовали воду без плазмохимической обработки. Количество семян в каждой чашке составляло 50 шт. Ежедневно наблюдали за появлением корешков и росточков. К числу нормально проросших семян относили те, которые имели развитый зародышевый корешок размером более длины семени.

Грунтовую всхожесть определяли, высаживая сухие семена в почву, которую перед посадкой увлажняли и затем ежедневно поли-

вали плазменно-активированной водой. Наблюдали за появлением и последующим развитием ростков, измеряя длину стебля и площадь поверхности листьев. В контрольных экспериментах использовали водопроводную воду без обработки.

Отдельная серия опытов была выполнена с использованием в качестве стимулятора всхожести и роста растений водорастворимых фракций хитозана, которые получали путем газоразрядной обработки 1%-ного раствора хитозана в 2%-ной уксусной кислоте. Использовалась та же установка и те же экспериментальные условия, что и для обработки воды. Водорастворимые фракции хитозана выделяли из обработанных растворов по методике, приведенной в [27]. После обработки раствора величину его pH доводили до 7,5 с помощью раствора NaOH. Выпавший при этом в осадок хитозан удаляли центрифугированием при 3000 об/мин в течение 30 мин. Затем раствор смешивали с равным объемом ацетона, чтобы получить второй осадок (водорастворимый хитозан). Осадок хитозана сушили при 60 °С в течение 24 часов. Выход низкомолекулярных водорастворимых фракций составил 12,8 % по массе. Для проращивания семян и полива почвы использовали 0,2%-ный раствор низкомолекулярных фракций хитозана в дистиллированной воде.

### Результаты и их обсуждение

Типичные осциллограммы интенсивности излучения разряда, напряжения на электродах и тока приведены в работе [28]. Импульсы разряда имели квазипериодический характер. Длительность импульсов и частота их следования зависели от приложенного к электродам напряжения и от суммарного времени горения разряда, что связано с нагревом жидкости и изменением ее электропроводности. При времени протекания тока через ячейку более 150 секунд частота следования импульсов достигала стационарных значений, которые увеличивались с ростом напряжения (рассеиваемой в ячейке мощности). При использованных в наших экспериментах амплитудных значениях напряжения  $800 \pm 40$  В частота импульсов разряда составляла  $\sim 25$  с<sup>-1</sup>, средняя величина рассеиваемой в разряде

мощности – около 120 Вт, а средняя энергия одиночных разрядов  $\sim 4,2 \pm 0,5$  Дж.

На рис. 2 показано изменение удельной электропроводности  $\sigma$  и водородного показателя pH воды в зависимости от времени газоразрядной обработки. Электропроводность увеличивается, а величина pH уменьшается со временем, но эти изменения гораздо меньше, чем при использовании для обработки воды разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении [29]. На рис. 2 представлены также концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NO}_2^-$ , которые не превышали  $3,6 \times 10^{-4}$  и  $2,6 \times 10^{-4}$  моль/л соответственно. Концентрация пероксида водорода после 20 минут обработки составила  $1,2 \pm 0,3$  ммоль/л.

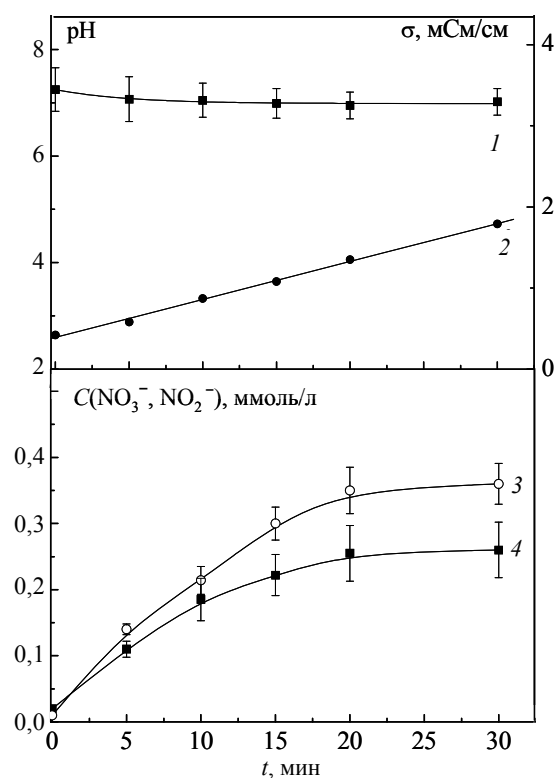


Рис. 2. Зависимость pH (1), электропроводности (2), концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  (3) и  $\text{NO}_2^-$  (4) от времени газоразрядной обработки воды.

Влияние воды, обработанной плазмой в течение 20 минут, на всхожесть семян и на темпы раннего развития огурцов иллюстрируется фотографиями, представленными на рис. 3. Количественные характеристики всхожести и темпов развития растений приведены на рис. 4 и в таблице. Лабораторная всхожесть огурцов повышается как при использовании PAW, так и водорастворимых продуктов деструкции

хитозана по сравнению с семенами, при проращивании которых использовали необработанную водопроводную воду. В пределах погрешностей экспериментов результаты,

полученные с продуктами деструкции хитозана и PAW, не отличаются: в обоих случаях всхожесть достигала  $95 \pm 5\%$  против  $69 \pm 3\%$  в контрольных партиях семян.



Рис. 3. Семена огурцов на третий день проращивания при использовании воды без обработки (а), воды после газоразрядной обработки (б), водного раствора хитозана (в) и проростки после 8 дней выращивания в почве (г) при поливе водой без обработки (1, 2) и после газоразрядной обработки (3, 4).

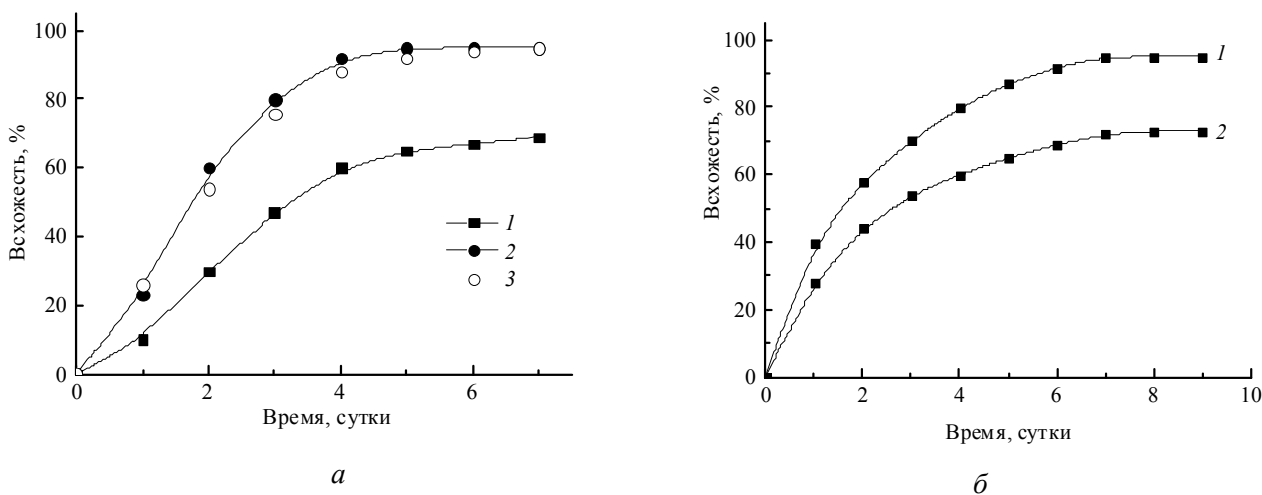


Рис. 4. Лабораторная (а) и грунтовая всхожесть (б) огурцов при использовании воды после газоразрядной обработки (1), без обработки (2) и водных растворов низкомолекулярных фракций хитозана (3).

Таблица

Характеристики темпов развития растений при посеве в грунт

Способ обработки	Длина стебля, мм			Площадь листовой поверхности, см <sup>2</sup>		
	3 сутки	5 сутки	7 сутки	3 сутки	5 сутки	7 сутки
Контроль	20	42	50	2,2	5,4	9,9
Плазменно-активированная вода	30	57	62	7,8	15,5	22,2

Примечание: приведена площадь листьев на 10 растениях.

Полив плазменно-активированной водой при посеве семян в грунт тоже ускоряет их прорастание и увеличивает всхожесть (рис. 4, б). Кроме того, ускоряется развитие корневой системы, рост стебля и листьев. Это видно на фотографиях (рис. 3, з) и из данных, представленных на рис. 4 и в таблице. Использование RAW для полива увеличивает площадь листовой поверхности примерно в 2 раза по сравнению с контрольными растениями.

Подобные результаты были получены ранее при исследовании всхожести и развития ярового ячменя (*Hordeum vulgare*) с использованием RAW и 1%-ного водного раствора низкомолекулярных фракций хитозана [16]. В цитируемой работе использовали воду, обработанную подводным диафрагменным разрядом, а низкомолекулярные фракции хитозана получали воздействием электронно-пучковой плазмы при пониженном давлении на порошок хитозана, как описано в [30]. Необходимо, однако, отметить, что наши эксперименты показали нецелесообразность использования 1%-ного раствора низкомолекулярных фракций хитозана при проращивании огурцов: раствор такой концентрации не приводил к улучшению всхожести и темпов роста растений. Лучшие результаты по всхожести были получены при уменьшении концентрации раствора до 0,2 %. Очевидно, основными факторами, вызывающими улучшение всхожести семян и развития растений при использовании воды после газоразрядной обработки, являются ее бактерицидные и фунгицидные свойства – способность подавлять фитопатогены за счет присутствия кислородсодержащих активных частиц (в частности, пероксида водорода), а также стимулирующее действие небольшого количества нитритов и нитратов, которые накапливаются в воде. Механизмы стимулирующего действия пероксида водорода и азотсодержащих активных компонентов на всхожесть семян и рост растений рассмотрены в работах [10, 31].

### Заключение

Экспериментально показано, что обработка воды с использованием подводного разряда приводит к накоплению в ней пероксида

водорода, нитрат- и нитрит-ионов, совместное действие которых улучшает всхожесть семян огурцов, в том числе и в грунте, а также ускоренный рост корневой системы и листьев растений на ранних стадиях развития. К таким же результатам приводит использование низкомолекулярных водорастворимых фракций хитозана, полученных при плазмохимической обработке его растворов. Однако процесс выделения водорастворимых фракций хитозана более длительный и трудоемкий, чем получение плазменно-активированной воды.

Таким образом, относительная простота аппаратного оформления и низкое энергопотребление на производство плазменно-активированной воды делает этот процесс привлекательным для использования при тепличном выращивании огурцов, в том числе, в системах, использующих капельный полив или приемы гидропоники.

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований, проект № 20-02-00501 А.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. – CRC Press, 2012.
2. Malik M. A. // Plasma Chem. Plasma Proc. 2010. Vol. 30. P. 21.
3. Maksimov A. I., Naumova I. K., Khlyustova A. V. // High Energy Chemistry. 2012. Vol. 46. P. 212.
4. Oehmigen K., Hahnel M., Brandenburg R., Wilke Ch., Weltmann K.-D., von Woedtke Th. // Plasma Proc. Polym. 2010. Vol. 7. P. 250.
5. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A., Friedrich J. // Plasma Proc. Polym. 2008. Vol. 5. P. 695.
6. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A., Rybkin V. V. // J. Colloid Interface Sci. 2006. Vol. 300. P. 640.
7. Titov V. A., Rybkin V. V., Shikova T. G., Ageeva T. A., Golubchikov O. A., Choi H. S. // Surf. Coat. Technol. 2005. Vol. 199. P. 231.
8. Saito G., Akiama T. // Journal of Nanomaterials. 2015. Vol. 2015. Article ID 123696.
9. Chen Q., Li J., Li Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. P. 424005.
10. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J., Rojas-Pierce M., Hernandez R., Gatiboni L., Grunden A., Stapelmann K. // Plasma Process. Polym. 2020. Vol. 18. P. e2000162.
11. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. // Trends in Food Science & Technology. 2019. Vol. 86. P. 95.

12. *Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M.* // *Processes*. 2020. Vol. 8. № 8. P. 1002.
13. *Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Sili-veru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V. P.* // *Trends Food Sci. Technol.* 2018. Vol. 77. P. 21.
14. *Sivachandiran L., Khacef A.* // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 1822.
15. *Chen D., Chen P., Cheng Y., Peng P., Liu J., Ma Y., et al.* // *Food Bioproc. Tech.* 2019. Vol. 12. P. 246.
16. *Наумова И. К., Тумов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А.* // *Прикладная физика*. 2020. № 6. С. 34.
17. *Zhou R., Li J., Zhou R., Zhang X., Yang S.* // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2019. Vol. 53. P. 36.
18. *Lo Porto C., Ziuzina D., Los A., Boehm D., Palumbo F., Favia P., Tiwari B., Bourke P., Cullen P. J.* // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2018. Vol. 49. P. 13.
19. *Наумова И. К., Субботкина И. Н., Шаповалова Т. А., Силкин С. В.* // *Бутлеровские сообщения*. 2015. Т. 42. С. 19.
20. *Zhang S., Rousseau A., Dufour T.* // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 31244.
21. *Naumova I. K., Maksimov A. I., Khlyustova A. V.* // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2011. Vol. 47. P. 263.
22. *Takahata J., Takaki K., Satta N., Takahashi R., Sasaki Y.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 54. P. 01AG07.
23. *Park D. P., Davis K., Gilani S., Alonzo C.-A., Dobrynin D., Friedman G., Rabinovich A., Fridman G.* // *Current Appl. Phys.* 2013. Vol. 13. P. S19.
24. *Titova Yu. V., Stokozenko V. G., Maximov A. I.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. P. 933.
25. *Skoog D. A., West D. M.* *Fundamentals of Analytical Chemistry*. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
26. *Васько В. Т.* *Основы семеноведения полевых культур*. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012.
27. *Tantiplapol T., Singsawat Y., Naringsil N., Damrongsakkul S., Saito N., Prasertsung I.* // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2015. Vol. 32. P. 116.
28. *Titov V. A., Khlyustova A. V., Naumova I. K., Sirotkin N. A., Agafonov A. V.* // *Plasma Phys. Rep.* 2020. Vol. 46. № 4. P. 472.
29. *Shutov D. A., Batova N. A., Rybkin V. V.* // *High Energy Chemistry*. 2020. Vol. 54. P. 59.
30. *Vasilieva T. M., Naumova I. K., Galkina O. V., Udoratina E. V., Kuvschinova L. A., Vasiliev M. N., Khin Maung Htay, Htet Ko Ko Zaw* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2020. Vol. 48. № 4. P. 1035.
31. *Corinna B., Kutai K., Magureanu M., Puač N., Živković S.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. Vol. 53. № 2. P. 223001.

PACS: 52.80. Hc; 81.65.Cf

## Effect of water activated by non-equilibrium gas-discharge plasma on the germination and early growth of cucumbers (*Cucumis sativus*)

*I. K. Naumova<sup>1</sup>, I. N. Subbotkina<sup>1</sup>, V. A. Titov<sup>2</sup>, A. V. Khlyustova<sup>2</sup>, and N. A. Sirotkin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ivanovo State Agricultural Academy  
45 Sovetskaya st., Ivanovo, 153012, Russia  
E-mail: irinauma@mail.ru

<sup>2</sup> G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences  
1 Akademicheskaya st., Ivahovo, 153045, Russia

*Received July 16, 2021*

*The article presents the results of plasma-chemical treatment of water and studies of its effect on the germination of cucumber seeds, as well as on the dynamics of the initial growth of plants. Tap water was treated with a pulsed underwater discharge formed in vapor-gas bubbles near the surface of a graphite electrode immersed in water. The discharge burned at peak voltage values of 800 V and a discharge current of 200 mA. Oscillograms of the current and voltage on the electrodes were obtained, the values of the specific electrical conductivity of water, the pH value, the concentrations of nitrite and nitrate ions, and also hydrogen peroxide in the treated water were measured. It is shown that the application of the plasma treated water*

***increases the seed germination, accelerates the development of the root system, the growth of stem and leaves at the early stages of plant development.***

**Keywords:** plasma, pulsed underwater discharge, plasma-activated water, active species, seeds, germination.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-40-46

## REFERENCES

1. Y. Yang, Y. I. Cho, and A. Fridman, *Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications*. (CRC Press, 2012).
2. M. A. Malik, *Plasma Chem. Plasma Proc.* **30**, 21 (2010).
3. A. I. Maksimov, I. K. Naumova, and A. V. Khlyustova, *High Energy Chemistry* **46**, 212 (2012).
4. K. Oehmigen, M. Hahnel, R. Brandenburg, Ch. Wilke, K.-D. Weltmann, and Th. von Woedtke, *Plasma Proc. Polym.* **7**, 250 (2010).
5. R. Joshi, R.-D. Schulze, A. Meyer-Plath, and J. Friedrich, *Plasma Proc. Polym.* **5**, 695 (2008).
6. H. S. Choi, T. G. Shikova, V. A. Titov, and V. V. Rybkin, *J. Colloid Interface Sci.* **300**, 640 (2006).
7. V. A. Titov, V. V. Rybkin, T. G. Shikova, T. A. Ageeva, O. A. Golubchikov, and H. S. Choi, *Surf. Coat. Technol.* **199**, 231 (2005).
8. G. Saito and T. Akiama, *Journal of Nanomaterials* **2015**, Article ID 123696 (2015).
9. Q. Chen, J. Li, and Y. Li, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 424005 (2015).
10. P. Ranieri, N. Sponsel, J. Kizer, M. Rojas-Pierce, R. Hernandez, L. Gatiboni, A. Grunden, and K. Stapelmann, *Plasma Process Polym.* **18**, e2000162 (2020).
11. E. J. Rifna, K. Ratish Ramanan, and R. Mahendran, *Trends Food Sci. Technol.* **86**, 95 (2019).
12. P. Attri, K. Ishikawa, T. Okumura, K. Koga, and M. Shiratani, *Processes* **8**, 1002 (2020).
13. R. Thirumdas, A. Kothakota, U. Annapure, K. Siliveru, R. Blundell, R. Gatt, and V. P. Valdramidis, *Trends Food Sci. Technol.* **77**, 21 (2018).
14. L. Sivachandiran and A. Khacef, *RSC Advances* **7**, 1822 (2017).
15. D. Chen, P. Chen, Y. Cheng, P. Peng, J. Liu, Y. Ma, et al., *Food Bioproc. Tech.* **12**, 246 (2019).
16. I. K. Naumova, V. A. Titov, A. V. Khlyustova, and N. A. Sirotkin, *Applied Physics*, No. 6, 34 (2020) [in Russian].
17. R. Zhou, J. Li, R. Zhou, X. Zhang, and S. Yang, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **53**, 36 (2019).
18. C. Lo Porto, D. Ziuzina, A. Los, D. Boehm, F. Palumbo, P. Favia, B. Tiwari, P. Bourke, and P. J. Cullen, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **49**, 13 (2018).
19. I. K. Naumova, I. N. Subbotkina, T. A. Shapovalova, and S. V. Silkin, *Butlerov Communications* **42**, 19 (2015).
20. S. Zhang, A. Rousseau, and T. Dufour, *RSC Advances* **7**, 31244 (2017).
21. I. K. Naumova, A. I. Maksimov, and A. V. Khlyustova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **47**, 263 (2011).
22. J. Takahata, K. Takaki, N. Satta, R. Takahashi, and Y. Sasaki, *Jap. J. Appl. Phys.* **54**, 01AG07 (2015).
23. D. P. Park, K. Davis, S. Gilani, C.-A. Alonzo, D. Dobrynin, G. Friedman, A. Rabinovich, and G. Fridman, *Current Appl. Phys.* **13**, S19 (2013).
24. Yu. V. Titova, V. G. Stokozenko, and A. I. Maximov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 933 (2010).
25. D. A. Skoog and D. M. West, *Fundamentals of Analytical Chemistry*. (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976).
26. V. T. Vasko, *Fundamentals of field crops seed science*. (Publishing house "Lan", S-Pb., 2012).
27. T. Tantiplapol, Y. Singsawat, N. Naringsil, S. Damrongsakkul, N. Saito, and I. Prasertsung, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **32**, 116 (2015).
28. V. A. Titov, A. V. Khlyustova, I. K. Naumova, N. A. Sirotkin, and A. V. Agafonov, *Plasma Phys. Rep.* **46**, 472 (2020).
29. D. A. Shutov, N. A. Batova, and V. V. Rybkin, *High Energy Chemistry* **54**, 59 (2020).
30. T. M. Vasilieva, I. K. Naumova, O. V. Galkina, E. V. Udoratina, L. A. Kuvshinova, M. N. Vasiliev, Khin Maung Htay, and Htet Ko Ko Zaw, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48**, 1035 (2020).
31. B. Corinna, K. Kutai, M. Magureanu, N. Puač, and S. Živković, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 223001 (2020).