

## Плазмохимическая обработка воды для повышения всхожести семян ярового ячменя *Hordeum vulgare*

И. К. Наумова, В. А. Титов, А. В. Хлюстова, Н. А. Сироткин

*В статье представлены результаты плазмохимической обработки воды и исследования ее влияния на всхожесть семян ярового ячменя, а также на динамику начального роста растений. Водопроводную воду обрабатывали диафрагменным разрядом переменного тока при амплитудных значениях напряжения 4 кВ и тока разряда 50 мА. Получены осциллограммы тока и напряжения на электродах, спектры излучения плазмы. Измерены значения удельной электропроводности воды, значения pH, концентрации нитрит- и нитрат-ионов, а также пероксида водорода в обработанной воде. Показано, что использование воды после плазмохимической обработки приводит к повышению всхожести семян и ускорению развития растений на ранних стадиях.*

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

**Ссылка:** Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 34.

**Reference:** I. K. Naumova, V. A. Titov, A. V. Khlyustova, and N. A. Sirotkin, Applied Physics, No. 6, 34 (2020) [in Russian].

### Введение

В настоящее время активно изучаются возможные пути применения низкотемпературной плазмы в сельском хозяйстве и в производстве пищевых продуктов [1–6]. Это междисциплинарное направление рассматривается как одно из актуальных в развитии прикладной физики плазмы и плазмохимии [6]. В частности, показано, что использование

неравновесной плазмы позволяет улучшить всхожесть семян ряда зерновых, овощных и цветочных культур. Для этих целей используется как непосредственная обработка семян в плазме, генерируемой разрядами при пониженном или атмосферном давлении, так и газоразрядная обработка воды, которую применяют на стадии проращивания семян.

Плазменная обработка как дистиллированной, так и обычной водопроводной воды приводит к появлению в ней химически активных частиц с существенно различным временем жизни: атомов водорода и кислорода, радикалов OH, HO<sub>2</sub>, молекул озона (O<sub>3</sub>), пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), а также нитрат- и нитрит-ионов. В результате обработки изменяются некоторые физико-химические свойства воды: водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность. Высказывалась гипотеза о том, что под действием плазмы сетка водородных связей между молекулами воды становится более «рыхлой». Все это дало основание говорить о так называемой «плазменно-активированной воде» («plasma activated water» или со-

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

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

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.

E-mail: irinauma@mail.ru

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

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

E-mail: titov25@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02 ноября 2020 г.

© Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., 2020

кращенно PAW), обладающей повышенной химической и биохимической активностью [7].

В ряде исследований показано, что использование PAW увеличивает всхожесть семян и темпы раннего развития растений [8–16]. Так, замачивание семян ржи и циннии однолетней в воде, обработанной диафрагменным разрядом, не только увеличило их всхожесть, но и способствовало ускоренному развитию корневой системы растений [8]. Авторы предположили, за эти эффекты ответственны образовавшиеся в воде пероксид водорода и долгоживущие азотсодержащие частицы. Ускоренный рост шпината, редиса и клубники при использовании воды, обработанной плазмой, которую возбуждали в пузырьках газа в воде, отмечен в работе [9]. Парк с соавторами показали, что использование активированной плазмой воды в разной степени влияет на скорость роста различных растений (редис, перец, томаты, бобы, цинния) [10]. 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).

Применение PAW, полученной путем обработки струей плазмы в гелии, при проращивании семян чечевицы привело к увеличению всхожести с 30 до 80 % [11]. Кроме того, отмечена большая длина стеблей по сравнению с контрольной партией растений. Для объяснения такого эффекта исследователи предположили, что в воде при плазменной обработке накапливаются радикалы азота (NO) и перекись водорода. Улучшение всхожести при использовании PAW показано также для семян редьки [12], ячменя [13], фасоли золотистой (бобов мунг) [14], сои [15], семенного картофеля [16].

Целью данной работы является изучение влияния воды, обработанной действием плазмы диафрагменного разряда, на лабораторную и грунтовую всхожесть семян ярового ячменя, а также на динамику раннего развития растений.

### Методики экспериментов

Схема экспериментальной ячейки для возбуждения диафрагменного разряда показана на рис. 1, там же приведена фотография разряда. Разряд возбуждали, прикладывая пе-

ременное напряжение к цилиндрическим графитовым электродам диаметром 5 мм, погруженным в водопроводную воду. Один из электродов помещен в кварцевую ампулу, в стенке которой сделано отверстие диаметром ~2 мм (диафрагма). Разряд квазипериодически возникал в парогазовых пузырьках, формирующихся в диафрагме за счет перегрева жидкости. Использовали источник питания промышленной частоты (50 Гц) с выходным напряжением до 10 кВ. Осциллограммы тока и напряжения между электродами регистрировали цифровым осциллографом OWON PDS 5022С и многоканальным аналого-цифровым преобразователем Measurement minilab 1008, связанным с персональным компьютером. Типичные осциллограммы показаны на рис. 2. Спектры излучения разряда регистрировали спектрофотометром AvaSpec ULS3648. Подробнее схема установки описана в [17].

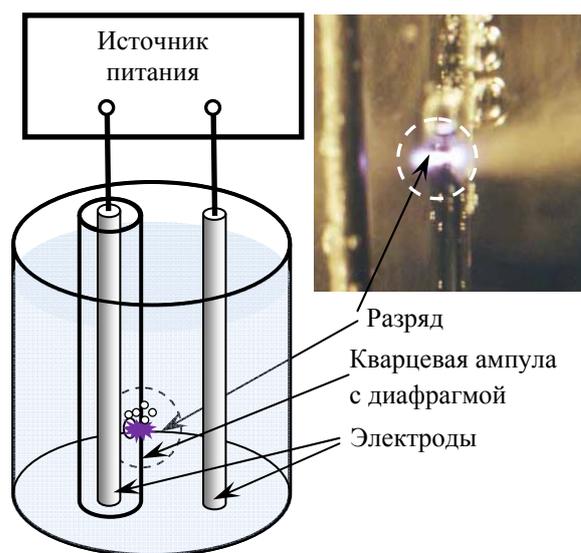


Рис. 1. Схема разрядной ячейки и фотография разряда.

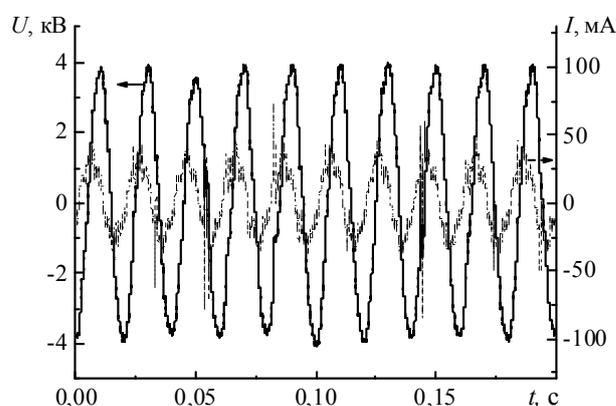


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на электродах.

Обработку воды проводили при амплитудных значениях тока 50 мА и напряжения на электродах около 4 кВ в течение 10 минут, объем воды в ячейке был 200 мл. Начальная температура воды была комнатной, после обработки она не превышала 45 °С. Обработанную воду охлаждали до комнатной температуры и использовали для замачивания семян перед посевом и для полива почвы в период прорастания и последующего развития растений.

Удельную электропроводность воды до и после обработки измеряли кондуктометром Анион 4100, величину рН – иономером И-160МИ. Концентрацию нитрит- и нитрат-ионов в воде определяли с использованием ион-селективных электродов Элит-071 (ионы  $\text{NO}_2^-$ ) и Элит-021 (ионы  $\text{NO}_3^-$ ) и иономера И-160МИ. Концентрацию пероксида водорода в воде находили по результатам иодометрического титрования [18].

Всхожесть семян исследовали по двум методикам [19]. Первая методика предназначена для определения лабораторной всхожести. Семена помещали в чашки Петри на хлопчатобумажную ткань, увлажненную водой после газоразрядной обработки, и выдерживали при комнатной температуре ( $20 \pm 2$  °С) в течение 7 суток, смачивая ткань обработанной водой каждые сутки. Количество семян в каждой чашке составляло 50 шт. Контрольные партии семян прорастивали с использованием воды, не подвергнутой обработке. Ежедневно визуально контролировали внешний вид семян: появление корешков и их длину. К всхожим семенам относили те, которые имели корешки размером не менее длины семени. По второй методике определяли грунтовую всхожесть семян. Сухие семена высаживали в почву, которую перед этим увлажняли плазменно-активированной водой, и наблюдали за появлением ростков, а также за их последующим ростом. Почву поливали РАВ ежедневно. Контрольную партию семян прорастивали аналогично, используя водопроводную воду без обработки, которая перед поливом выдерживалась в течение суток при комнатной температуре.

### Результаты и их обсуждение

Влияние воды, обработанной плазмой, на всхожесть семян ячменя иллюстрируется

фотографиями (рис. 3), а количественные характеристики всхожести и дальнейшего развития листовой поверхности растений представлены в таблице. Эксперименты показали, что как лабораторная, так и грунтовая всхожесть ячменя повышаются при использовании РАВ, достигая 97 и 86 %, соответственно, при 92 и 79 % всхожести в контрольных партиях семян.



**Рис. 3.** Семена ячменя *Hordeum vulgare* на третий день прорастания при использовании воды без обработки (а, в) и после газоразрядной обработки (б, з).

Полив плазменно-активированной водой при посеве семян в грунт не только ускоряет их всхожесть, но и способствует дальнейшему ускоренному развитию растений. Это хорошо видно на фотографиях, где показаны ростки ячменя через 8 дней после посева при поливе РАВ и водопроводной водой без обработки (рис. 4). В агрономии динамику развития зерновых культур оценивают по площади листовой поверхности определенного количества растений на стадиях кущения и выхода в трубку. Кущением называют появление новых побегов за счет подземного ветвления стебля. Эта стадия в развитии ячменя считается самой

уязвимой к факторам внешней среды. Во время кушения происходит обильный рост корней, закладка побегов и колосков. Начало фазы выхода в трубку совпадает с началом роста стебля и формирования бугорков в колосе. Представленные в таблице данные показывают, что использование PAW для полива увеличивает площадь листовой поверхности в 1,35 раза в начале фазы кушения по сравнению с контрольными растениями. На более поздней стадии роста (стадии выхода в трубку) эффект от использования плазменно-активированной воды несколько ниже: площадь листовой поверхности выше, чем у контрольных растений лишь на 23 %.

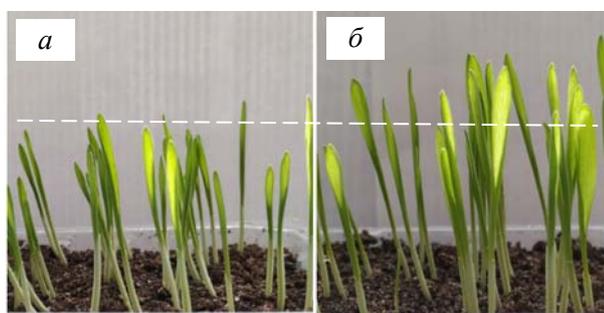


Рис. 4. Фотографии ростков ячменя через 8 дней после посева в грунт при поливе водой без обработки (а) и плазменно-активированной водой (б).

Полученные результаты целесообразно сравнить с теми, что достигаются при использовании других фитостимуляторов – низкомолекулярных олигомеров хитозана, раствори-

мых в воде. Такие олигомеры со средней молекулярной массой  $M_w = 800-2000$  Да были получены путем деструкции хитозана в электронно-пучковой плазме и испытаны на той же зерновой культуре (*Hordeum vulgare*) с использованием аналогичных методик и критериев оценки всхожести и развития растений [20]. Проращивание семян с использованием 1%-го водного раствора олигомеров хитозана дало соизмеримые результаты с теми, что получены с применением плазменно-активированной воды: грунтовая всхожесть увеличилась до 91 %, а площадь листовой поверхности на стадии кушения – до 4,7 м<sup>2</sup> (см. таблицу).

Механизмы фитостимулирующего действия PAW к настоящему времени не установлены. В литературе высказываются предположения о том, что наблюдаемые эффекты связаны с рядом факторов. Одним из важных считается бактерицидное действие плазменной обработки – подавление фитопатогенов в воде и в почве. Бактерицидное действие диафрагменного разряда в экспериментальных условиях, близких к использованным в нашей работе, было показано в [21]. Второй фактор – накопление в воде нитритов и нитратов как удобрений. Высказывается и предположение о том, что при газоразрядной обработке вода обогащается нанобузырьками газа, что также способствует ускорению развития растений [22].

Таблица

**Всхожесть ярового ячменя и площадь листовой поверхности на разных стадиях развития растений при использовании плазменно-активированной воды и хитоолигосахаридов**

Способ обработки	Лабораторная всхожесть, %	Грунтовая всхожесть, %	Площадь листовой поверхности, м <sup>2</sup>	
			На стадии кушения	На стадии формирования стебля
Контроль	92	79	3,1	9,3
Плазменно-активированная вода	97	86	4,2	11,4
Хитоолигосахариды	–	91	4,7	11,6

Наши измерения показали, что после 10 минут обработки водопроводной воды ее электропроводность увеличилась от  $0,387 \pm 0,056$  до  $0,486 \pm 0,062$  мСм/см, величина pH изменилась незначительно (с  $7,35 \pm 0,18$  до  $7,71 \pm 0,15$ ). Увеличилась концентрация нитрат-

ионов с  $0,20 \pm 0,05$  до  $0,38 \pm 0,04$  ммоль/л и нитрит-ионов с  $0,05$  до  $2,35 \pm 0,22$  ммоль/л. Источником этих ионов могут быть иницирированные плазмой реакции растворенного в воде азота, хотя концентрация его очень мала. По крайней мере, полосы излучения молекул

$N_2$  или  $NO$  в спектрах излучения разряда зарегистрированы не были. В спектре отчетливо проявляются лишь полосы излучения радикала  $OH$ , а также линии атомарного водорода ( $H\alpha$ ) и кислорода (рис. 5). Концентрация пероксида водорода в воде после обработки составила  $1,5 \pm 0,2$  ммоль/л. Очевидно, совокупное действие всех этих факторов и обеспечивает улучшение всхожести семян и ускоренное развитие растений.

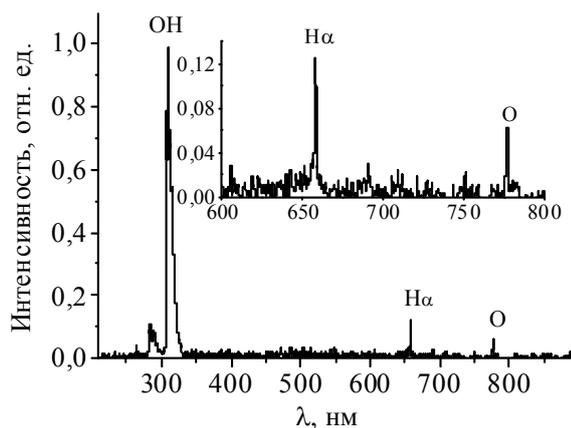


Рис. 5. Спектр излучения плазмы диафрагменного разряда в воде.

### Заключение

Таким образом, экспериментально показано, что использование водопроводной воды, обработанной диафрагменным разрядом переменного тока, приводит к улучшению всхожести семян ярового ячменя, а также к ускорению развития листовой поверхности растений. Возможные причины фитостимулирующих свойств воды связаны с комбинированным действием пероксида водорода, нитрат- и нитрит-ионов, которые образуются в воде в результате плазмохимической обработки.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M. // *Processes*. 2020. Vol. 8. № 8. P. 1002.
2. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J., Rojas-Pierce M., Hernandez R., Gatiboni L., Grunden A., Stapelmann K. // *Plasma Process. Polym.* 2020. P. e2000162.
3. Puač N., Gherardi M., Shiratani M. // *Plasma Proc. Polymer.* 2017. Vol. 15. № 2. P. e1700174.
4. Rifna E. J., Ratish Ramanan K., Mahendran R. // *Trends Food Sci. Technol.* 2019. Vol. 86. P. 95.
5. Ito M., Oh J.-S., Ohta T., Shiratani M., Hori M. // *Plasma Proc. Polymer.* 2018. Vol. 15. P. e1700073.
6. Adamovich I. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. Vol. 50. P. 323001.
7. Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Siliveru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V. P. // *Trends Food Sci. Technol.* 2018. Vol. 77. P. 21.
8. Naumova I. K., Maksimov A. I., Khlyustova A. V. // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2011. Vol. 47. P. 263.
9. Takahata J., Takaki K., Satta N., Takahashi R., Sasaki Y. // *Jap. J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 54. P. 01AG07.
10. 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.
11. Zhang S., Rousseau A., Dufour T. // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 31244.
12. Sivachandiran L., Khacef A. // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 1822.
13. Chen D., Chen P., Cheng Y., Peng P., Liu J., Ma Y., et al. // *Food Bioproc. Tech.* 2019. Vol. 12. P. 246.
14. Zhou R., Li J., Zhou R., Zhang X., Yang S. // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2019. Vol. 53. P. 36.
15. 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.
16. Наумова И. К., Субботкина И. Н., Шаповалова Т. А., Силкин С. В. // *Бутлеровские сообщения*. 2015. Т. 42. С. 19.
17. Khlyustova A., Sirotkin N., Evdokimova O., Prysiazhyi V., Titov V. // *J. Electrostat.* 2018. Vol. 96. P. 76.
18. Skoog D. A., West D. M. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
19. Васько В. Т. *Основы семеноведения полевых культур*. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012.
20. Vasilieva T. M., Naumova I. K., Galkina O. V., Udoratina E. V., Kuvshinova L. A., Vasiliev M. N., Khin Maung Htay, Htet Ko Ko Zaw // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2020. Vol. 48. № 4. P. 1035.
21. Maksimov A. I., Khlyustova A. V., Naumova I. K. // *High Energy Chemistry*. 2012. Vol. 46. № 3. P. 212.
22. Vanraes P., Bogaerts A. // *Appl. Phys. Rev.* 2018. Vol. 5. P. 031103.

## Plasma chemical treatment of water to enhance the germination of *Hordeum vulgare* spring barley seeds

I. K. Naumova<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

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

Received November 02, 2020

*The results of plasma-chemical treatment of water and its effect on the germination of *Hordeum vulgare* spring barley seeds and on the dynamics of the early growth of plants are presented. Tap water was treated with an alternating current diaphragm discharge at peak voltage of 4 kV and a discharge current of 50 mA. Oscillograms of the current and voltage on the electrodes, and plasma emission spectra were used for plasma characterization. The values of water electrical conductivity and pH, concentration of nitrite and nitrate ions, as well as hydrogen peroxide concentration in the plasma treated water have been measured. It is shown that the application of the plasma treated water results in an enhancement in seed germination and acceleration of early plant development.*

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

### REFERENCES

1. P. Attri, K. Ishikawa, T. Okumura, K. Koga, and M. Shiratani, *Processes* **8**, 1002 (2020).
2. P. Ranieri, N. Sponsel, J. Kizer, M. Rojas-Pierce, R. Hernandez, L. Gatiboni, A. Grunden, and K. Stapelmann, *Plasma Process Polym.* **18**, e2000162 (2020).
3. N. Puač, M. Gherardi, and M. Shiratani, *Plasma Proc. Polym.* **15**, e1700174 (2017).
4. E. J. Rifna, K. Ratish Ramanan, and R. Mahendran, *Trends Food Sci. Technol.* **86**, 95 (2019).
5. M. Ito, J.-S. Oh, T. Ohta, M. Shiratani, and M. Hori, *Plasma Process. Polym.* **15**, e1700073 (2018).
6. I. Adamovich et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 323001 (2017).
7. R. Thirumdas, A. Kothakota, U. Annapure, K. Siliveru, R. Blundell, R. Gatt, and V. P. Valdramidis, *Trends Food Sci. Technol.* **77**, 21 (2018).
8. I. K. Naumova, A. I. Maksimov, and A. V. Khlyustova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **47**, 263 (2011).
9. J. Takahata, K. Takaki, N. Satta, R. Takahashi, and Y. Sasaki, *Jap. J. Appl. Phys.* **54**, 01AG07 (2015).
10. 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).
11. S. Zhang, A. Rousseau, and T. Dufour, *RSC Advances* **7**, 31244 (2017).
12. L. Sivachandiran and A. Khacef, *RSC Advances* **7**, 1822 (2017).
13. D. Chen, P. Chen, Y. Cheng, P. Peng, J. Liu, Y. Ma, et al., *Food Bioproc. Tech.* **12**, 246 (2019).
14. R. Zhou, J. Li, R. Zhou, X. Zhang, and S. Yang, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **53**, 36 (2019).
15. 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).
16. I. K. Naumova, I. N. Subbotkina, T. A. Shapovalova, and S. V. Silkin, *Butlerov Communications* **42**, 19 (2015).
17. A. Khlyustova, N. Sirotkin, O. Evdokimova, V. Prysiaznyi, and V. Titov, *J. Electrostat.* **96**, 76 (2018).
18. D. A. Skoog and D. M. West, *Fundamentals of Analytical Chemistry* (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976).
19. V. T. Vasko, *Fundamentals of field crops seed science* (Publishing house "Lan", S-Pb., 2012).
20. 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).
21. A. I. Maksimov, A. V. Khlyustova, and I. K. Naumova, *High Energy Chemistry* **46**, 212 (2012).
22. P. Vanraes and A. Bogaerts, *Appl. Phys. Rev.* **5**, 031103 (2018).