

Изменение свойств и структуры поверхности семян зерновых культур под воздействием тлеющего разряда атмосферного давления*Б. Б. Балданов, Ц. В. Ранжуров, М. Н. Сордонова, Л. В. Будажапов*

Исследовано воздействие тлеющего разряда атмосферного давления на поверхностные свойства семян зерновых культур. Показано, что плазменная обработка позволяет значительно улучшить контактные свойства поверхности семян и получить низкие значения краевых углов смачивания. Воздействие на оболочку семени неравновесной плазмы тлеющего разряда атмосферного давления приводит к модификации поверхности семени, заключающаяся в проявлении на поверхности семени мелкочаистой сетчатой структур. При увеличении длительности воздействия или мощности разряда эффекты травления на поверхности семени усиливаются, но при этом скорость прорастания семян не увеличивается с интенсификацией параметров обработки.

Ключевые слова: плазменная модификация, тлеющий разряд атмосферного давления, семена, пшеница, всхожесть.

Ссылка: Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В., Сордонова М. Н., Будажапов Л. В. // Успехи прикладной физики. Т. 7. № 3. С. 260.

Reference: B. B. Baldanov, Ts. V. Ranzhurov, M. N. Sordonova, and L. V. Budazhapov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (3), 260 (2019).

Введение

В последнее время низкотемпературная (холодная) неравновесная плазма находит эффективное применение в сельском хозяйстве

Балданов Баир Батоевич¹, с.н.с., д.т.н.
Ранжуров Цыремпил Валерьевич¹, м.н.с.
Сордонова Маргарита Николаевна², зам. директора, к.с.-х.н.

Будажапов Лубсан-Зонды Владимирович², директор, д.б.н., профессор.

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, Россия, 670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

Тел. (3012) 43-32-24. E-mail: baibat@mail.ru

² Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства.

Россия, 670045, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Третьякова, 25 З, поселок Зеленхоз.

Тел. (3012) 33-14-46. E-mail: sordonova@yahoo.com; burnish@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2018 г.

© Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В., Сордонова М. Н., Будажапов Л. В., 2019

как альтернатива традиционной предпосевной обработке семян, включающей термо- и химическую обработку [1]. Использование плазменных технологий обладает целым рядом преимуществ перед традиционными технологиями: однородность обработки, сохранение целостности семян, отсутствие химических реагентов. Как следствие, применение плазменных технологий в сельском хозяйстве представляет собой переход на экологически чистые и безопасные технологии [1–3].

Для стимуляции прорастания семян и роста растений применяются различные источники низкотемпературной неравновесной плазмы, создаваемые на основе коронного разряда [4–6], ВЧ-разряда низкого давления [1], СВЧ-разряда [7] и других типов источников плазмы [8–10].

В работах [1, 7, 8, 11, 12] показано влияние предпосевной плазменной обработки на скорость прорастания семян, а также на дальнейший рост и развитие растений. При этом особо выделяется значительное увеличение

скорости прорастания семян, обработанных в плазме, по сравнению с контрольной группой (необработанные семена) [1, 7, 9, 11]. Например, при воздействии аргоновой ВЧ-плазмы в течение 130 мин. наблюдается 50%-увеличение прорастания семян *Carthamus tinctorium* [1]. В работе [7] в результате обработки микроволновым разрядом семян *Chenopodium album* (в течение 48 мин) наблюдается трехкратное увеличение скорости прорастания семян.

Одним из возможных объяснений механизма улучшения прорастания и роста семян растений при воздействии плазмы является то, что плазменная обработка индуцирует структурные изменения на поверхности семян [1, 3]. В работе [3] отмечено, что на прорастание семян сильное влияние оказывают химические реакции на поверхности семян, инициируемые при плазменном воздействии. В [13, 14] показано, что при плазменной обработке семян улучшается смачиваемость поверхности семян, что, в свою очередь, и приводит к повышению всхожести семян.

Основной целью данной работы является изучение влияния модификации поверхности семян в неравновесной низкотемпературной плазме тлеющего разряда атмосферного давления на посевные качества семян зерновых культур.

Экспериментальная техника и методика

Для плазменной обработки семян использовался источник объемной холодной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления (ТРАД) [15, 16]. Разряд создавался в специальной электродной конструкции с многоострийным секционированным катодом и плоским металлическим анодом. Для ввода и вывода аргона разрядная камера снабжена двумя штуцерами с внутренним диаметром $d = 4$ мм, ориентированными перпендикулярно направлению тока разряда. Расход аргона G измеряется с помощью ротаметра РМ-А-0,16 ГУЗ до значений 5×10^{-5} кг/с.

Радиус закругления острия иголок составлял 50 мкм, плотность острий в катодной секции – 1 острие на площадь $0,6 \times 0,6$ см². Для стабилизации разряда использовалась методика, предложенная в работах [17, 18], согласно которой каждое острие нагружалось регулируемым большим сопротивлением $R (> 1 \text{ МОм})$.

Анод представляет собой плоскую металлическую пластину площадью $S = 144$ см², причем в экспериментах вместо сплошной пластины использовалась мелкоячеистая сетка с размером ячеек 1×1 мм². Разряд зажигался с применением регулируемого высоковольтного источника ВС-20-10 ($U = 20$ кВ). Устойчивость разряда относительно перехода отрицательной короны в искровой пробой разрядного промежутка обеспечивается также слабой прокачкой газа через разрядный промежуток. Газ продувался перпендикулярно направлению электрического тока. Скорость прокачки газа v на входе в разрядную камеру варьировалась в пределах $0,45 \div 2,24$ м/с. Величина v рассчитывалась по величине массового расхода аргона G через поперечное сечение штуцера S по формуле $v = G/(\rho \times S)$, где S – площадь поперечного сечения штуцера, ρ – плотность газа.

Обработке подвергались семена яровой пшеницы сорта Бурятская остистая, селекции Бурятского НИИСХ. Были подготовлены две партии семян, каждая партия содержала 100 семян. Семена из одной партии были подвергнуты воздействию плазмы, в то время как семена из другой партии использовались в качестве контрольных. Семена равномерно распределялись по поверхности плоского анода, при этом семена не касались друг друга, и подвергались воздействию плазмы с различной экспозицией. Семена после плазменной обработки и семена контроля были высажены в чашки.

Изменение свойств поверхности характеризовали значениями краевых углов смачивания θ , которые определяли методу лежащей капли (точность $\pm 1^\circ$) с помощью микроскопа по воде (бидистилляту). Величины углов смачивания определялись с помощью программного пакета DropSnake – LB-ADSA. Топография поверхности семян исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM TM-1000 с системой микроанализа Hitachi TM-1000.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Электрические характеристики разряда

Фотография свечения тлеющего разряда атмосферного давления (ТРАД) в конфигурации электродов «многоострийный катод–

плоский анод» представлена на рис. 1. Разряд зажигается вначале на периферийных остриях, но при дальнейшем увеличении напряжения на разрядном промежутке зажигаются остальные острия. В импульсно-периодическом режиме отрицательной короны генерационные зоны вблизи коронирующих острий ярко выражены, а свечение межэлектродного промежутка слабое [16].



Рис. 1. Фотография свечения тлеющего разряда атмосферного давления. Межэлектродное расстояние $d = 2$ см.

В режиме тлеющего разряда атмосферного давления разряд наблюдается в виде однородных самостоятельных разрядов, заполняющих большую часть разрядной области и перекрывающих все межэлектродное расстояние. Поперечное сечение плазмы тлеющего разряда наблюдается в виде расширяющихся цилиндрических каналов, вершины которых располагались в области острий, а основание – около плоского анода [16].

На редуцированной вольтамперной характеристике (ВАХ) (см. рис. 2) выделяются два участка с линейной зависимостью приведенного тока от напряжения, а именно, в импульсно-периодическом режиме отрицательной короны (участок 1-2) и в режиме ТРАД (участок 2-3). При этом место пересечения двух экстраполированных прямых отождествляется с началом перехода режима коронного разряда в режим тлеющего разряда [19]. Как видно, включение ионизации в дрейфовой области разрядного промежутка приводит к более крутому нарастанию тока с напряжением в режиме тлеющего разряда атмосферного давления

по сравнению с режимом коронного разряда. После значения критического тока I^* , соответствующего излому редуцированной вольтамперной характеристики, свечение разряда однородно заполняет весь разрядный промежуток, что характерно для классического тлеющего разряда.

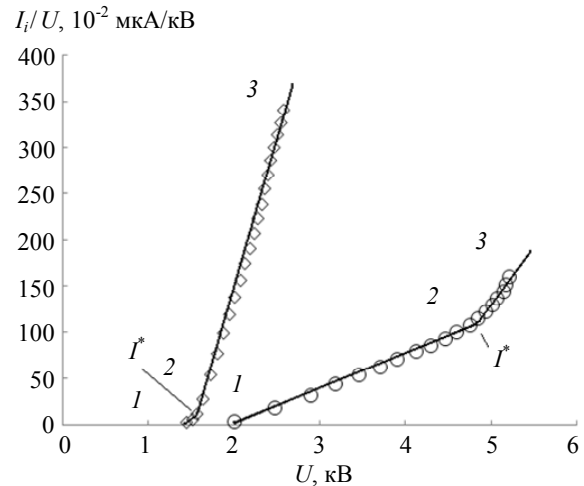


Рис. 2. Редуцированная ВАХ тлеющего разряда атмосферного давления (величина тока пересчитана на одно острие). I^* – критический ток перехода. Межэлектродное расстояние $d = 2$ см.

Распределение потенциала (см. рис. 3, а) и напряженности (см. рис. 3, б) электрического поля в разрядном промежутке достаточно однородное в большей части межэлектродного промежутка. Напряженность E электрического поля линейно растет с ростом плотности тока j . В отличие от тлеющего разряда среднего давления, где напряженность электрического поля увеличивается с ростом межэлектродного промежутка d , в ТРАД напряженность электрического поля остается неизменной с ростом межэлектродного расстояния d .

Вольтамперная характеристика ТРАД в геометрии «многоострыйный катод – плоский анод» является возрастающей, как видно из рис. 4 [15, 16].

Концентрация электронов n_e в положительном столбе ТРАД [20], получаемая из измерений полного тока I и сечения разряда S по формуле $I/S \approx j \approx e \mu_e E n_e$ (здесь μ_e – подвижность электронов), равна $n_e \approx 10^5 - 10^6$ см⁻³.

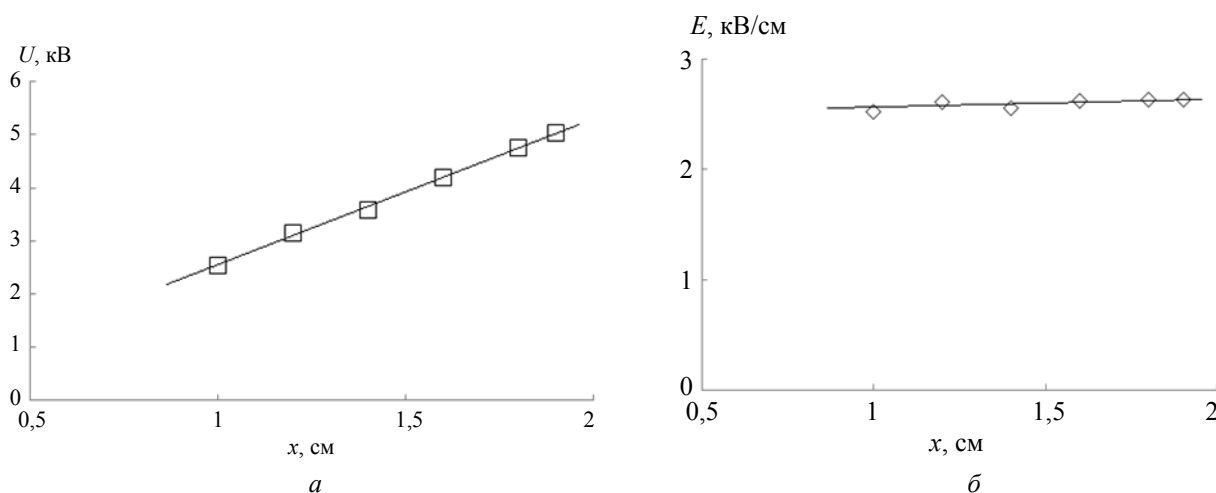


Рис. 3. Распределение потенциала U и напряженности электрического поля E в разрядном промежутке. Межэлектродное расстояние $d = 2$ см, плотность тока $j = 1,04$ мА/см².

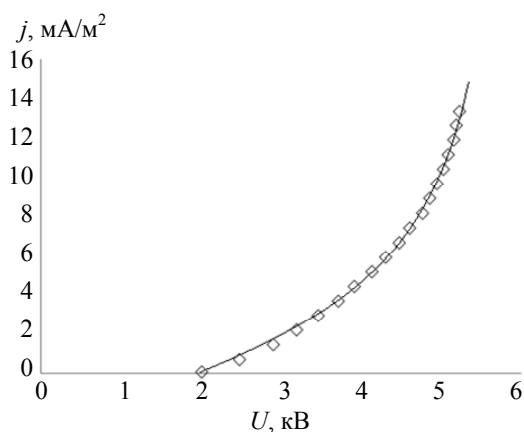


Рис. 4. Вольтамперная характеристика тлеющего разряда атмосферного давления. Межэлектродное расстояние $d = 2$ см.

Влияние плазменной обработки на всхожесть семян

Влияние плазменной обработки на скорость прорастания семян пшеницы проиллюстрировано на рис. 5.



Рис. 5. Всхожесть семян пшеницы. 1 – контроль; 2 – $I = 200$ мкА; 3 – $I = 500$ мкА. Время экспозиции $t = 30$ с.

Как видно, воздействие неравновесной аргоновой плазмы атмосферного давления оказывает положительный биостимулирующий

эффект на начальных этапах онтогенеза яровой пшеницы, а именно, значительно увеличивается всхожесть семян и стимулируется рост растений. Наибольший эффект проявляется при длительности воздействия $t \approx 30$ с при вкладываемой мощности $W \approx 5$ Вт. Под воздействием холодной аргоновой плазмы, генерируемой тлеющим разрядом атмосферного давления, стимулируется не только скорость прорастания семян, но и достигается значительное увеличение биомассы по сравнению с контрольными проростками.

Плазменная модификация поверхности семян

Для характеристики свойств обработанной поверхности семян пшеницы в плазме ТРАД использовали величины краевых углов смачивания θ , определенные по воде (рис. 6).

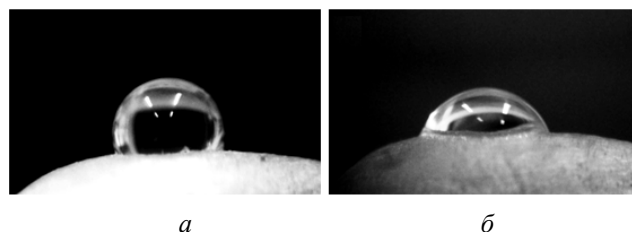


Рис. 6. Капли воды, осажденные на поверхности пшеницы. а – контроль; б – после плазменной обработки ($t = 60$ с).

Исходная поверхность семени пшеницы характеризуется сравнительно высокими значениями угла смачивания $\theta = 107^\circ$ (по воде) и низкой поверхностной энергией γ . В результа-

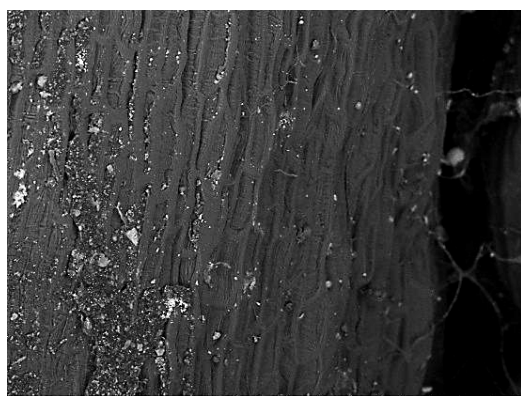
те воздействия неравновесной плазмы ТРАД на поверхность семян она становится гидрофильной и характеризуется низкими значениями углов смачивания $\theta = 57^\circ$, при этом существенно возрастает и поверхностная энергия γ .

Топография поверхности семян до и после плазменной обработки в ТРАД представлена на рис. 7.

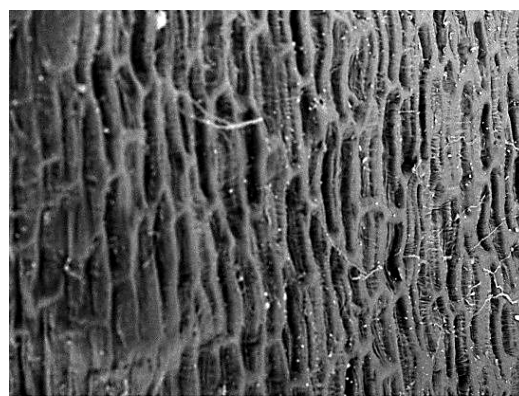
Оболочка семени пшеницы в контрольной группе (рис. 7, а) представляет собой достаточно ровную и гладкую поверхность. В результате воздействия холодной аргоновой плазмы ТРАД на оболочку семени (рис. 7, б) наблюдаются структурные изменения на поверхности семян, заключающиеся в проявлении на поверхности семени мелкоячеистой сетчатой структуры, причем с резко очерченными границами ячеек. При дальнейшем увеличении длительности воздействия или мощности разряда эффекты травления на поверхности семени усиливаются, но при этом скорость прорастания семян не увеличивается с интенсификацией параметров обработки.

Механизм, ответственный за влияние плазмы на скорость прорастания семян и рост растений, до сих пор является дискуссион-

ным. Это связано с тем, что семена представляют собой чрезвычайно сложный биологический объект, и воздействие плазмы на семена может протекать по нескольким каналам [22]: путем модификации поверхностного слоя семян, за счет реакций с участием электронов, ионов и активных радикалов, ультрафиолетового излучения плазмы и т. д. [8]. С другой стороны, параметры плазменной обработки, такие как свойства плазмы, мощность, состав и давление рабочего газа, также оказывают существенное влияние на реакцию семян при воздействии плазмы. Одним из наиболее важных факторов плазменной обработки является длительность обработки. Так, при кратковременном воздействии плазмы наблюдается незначительное влияние на прорастание и рост семян, но в то же время значительное увеличение длительности воздействия оказывает негативное влияние на семена [23–26]. Другим важным фактором, который необходимо принимать во внимание при плазменной обработке семян, является тип семян, поскольку семена различных видов растений могут по-разному реагировать на плазменное воздействие.



а



б

Рис. 7. Микрофотография поверхности семени пшеницы. Увеличение ($\times 300$). а – контроль (необработанная поверхность); б – после плазменной обработки в ТРАД. Ток разряда $I = 300$ мкА; время экспозиции $t = 30$ с.

В ряде исследований отмечается, что плазменная обработка индуцирует изменения на поверхности семян [1, 7, 8]. В [7, 8] показано, что в результате плазменной обработки поверхности семян пшеницы наблюдаются изменения поверхности. На микрофотографиях, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии видно, что после

плазменного воздействия поверхность семян имеет протравленный характер. Аналогичный эффект обнаружен и в работе [26] при плазменной обработке семян пшеницы. В [1] показана «рыхлая» структура поверхности семян после воздействия ВЧ-плазмы.

Изменение поверхностных свойств семян после плазменной обработки может интенсифи-

фицировать транспорт кислорода и воды через оболочку семени [1, 7, 24]. В [24] установлено, что увеличение количества воды в семенах пшеницы, бобов и чечевицы (по сравнению с контрольными образцами) происходит после плазменного воздействия.

Заключение

В работе изучено изменение поверхностных свойств семян пшеницы под воздействием нетермической плазмы, инициируемой тлеющим разрядом атмосферного давления в аргоне. Воздействие на оболочку семени холодной аргонной плазмы тлеющего разряда атмосферного давления приводит к модификации поверхности семени, заключающейся в проявлении на поверхности семени мелкоячеистой сетчатой структуры. Важно отметить, что при увеличении длительности воздействия или мощности разряда (сверх оптимальных) эффекты травления на поверхности семени усиливаются, но при этом скорость прорастания семян не увеличивается с интенсификацией параметров обработки.

Результаты, полученные в этом исследовании, показывают, что обработка нетермической плазмой положительно влияет на ускоренный рост семян пшеницы.

Благодаря своим преимуществам (однородная обработка, отсутствие разрушения семян, отсутствие требований к химическим веществам), плазма может стать эффективной альтернативой традиционной предпосевной обработке семян, используемой сейчас в сельском хозяйстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dhayal M., Lee S. Y., Park S. U. // *Vacuum*. 2006. Vol. 80. P. 499.
2. Selcuk M., Oksuz L., Basaran P. // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 5104.
3. Volin J. C., Denes F. D., Young R. A., Park S. M. T. // *Crop Science*. 2000. Vol. 40. P. 1706.

4. Lynikiene S., Pozeliene G. R. // *Int. Agrophys.* 2006. Vol. 20. P. 195.
5. Borodin I. F., Shcherbakov K. N. // *Mach. Agric.* 1998. Vol. 5. P. 35.
6. Palov I. // *Mach. Agric.* 2003. Vol. 15. P. 10.
7. Sera B., Stranak V., Sery M., Tichy M., Spatenka P. // *Plasma Science and Technology*. 2008. Vol. 10. P. 506.
8. Sera B., Spatenka P., Sery M., Vrchotova N., Hruskova I. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2010. Vol. 38. P. 2963.
9. Zivkovic S., Puac N., Giba Z., Grubisic D., Petrovic Z. Lj. // *Seed Science and Technology*. 2004. Vol. 32. P. 693.
10. Dobrin D., Magureanu M., Mandache N. B., Ionita M.-D. // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2015. Vol. 29. P. 255.
11. Lynikiene S., Pozeliene A., Rutkauskas G. // *International Agrophysics*. 2006. Vol. 20. P. 195.
12. Sera B., Sery M., Stranak V., Spatenka P., Tichy M. // *Plasma Science and Technology*. 2009. Vol. 11. P. 750.
13. Mitra A., Li Y. F., Klämpfl T. G., Shimizu T., Jeon J., Morfill G. E., Zimmermann J. L. // *Food Bioprocess Technol.* 2014. Vol. 7. P. 645.
14. Jiang J., He X., Li L., Li J., Shao H., Xu Q., Ye R., Dong Y. // *Plasma Sci. Technol.* 2014. Vol. 16. P. 54.
15. Балданов Б. Б., Норбоев Ч. Н. // *Прикладная физика*. 2009. № 3. С. 93.
16. Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В. // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 152.
17. Акишев Ю. С., Дерюгин А. А., Каральник В. Б., Кочетов И. В., Напартович А. П., Трушкин Н. И. // *Физика плазмы*. 1994. Т. 20. № 6. С. 571.
18. Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Кочетов И. В., Напартович А. П., Панькин М. В., Трушкин Н. И. // *Физика плазмы*. 2000. Т. 26. С. 172.
19. Дандарон Г.-Н. Б., Балданов Б. Б. // *Физика плазмы*. 2007. Т. 33. № 3. С. 273.
20. Велихов Е. П., Голубев В. С., Пашкин С. В. // *УФН*. 1982. Т. 137. Вып. 1. С. 117.
21. Zahoranová A., Henselová M., Hudecová D., Kaliňáková B., Kováčik D., Medvecká V., Černák M. // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. Vol. 36. P. 397.
22. Filatova I., Azharonoki V., Lushkevich V., Zhukovsky A., Gadzhieva G., Spasic K. / 31-st Int. Conf. Phenom. Ioniz. Gases (ICPIG), Granada, Spain, 2013.
23. Randeniya L. K., de Groot G. J. J. B. // *Plasma Processes and Polymers*. 2015. Vol. 12. P. 608.
24. Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., Drori E. // *Sci. Rep.* 2012. Vol. 2. P. 741.
25. Henselova M., Slovakova L., Martinka M., Zaharanova A. // *Biologia*. 2012. Vol. 67. P. 490.
26. Filatova I., Azharonoki V., Lushkevich V., Zhukovsky A., Gadzhieva G., Spasic K. // 31-st Int. Conf. Phenom. Ioniz. Gases (ICPIG), Granada, Spain, 2013.

Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of an atmospheric pressure glow discharge

B. B. Baldanov¹, Ts. V. Ranzhurov¹, M. N. Sordonova², and L. V. Budazhapov²

¹Institute of Physical Materials Science, SB RAS
6 Sakh'yanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia
E-mail: baibat@mail.ru

²Buryat Research Institute of Agriculture
25z Tretiakova st., Ulan-Ude, 670045, Russia
E-mail: sordonova@yahoo.com; burnish@inbox.ru

Received November 20, 2018

The effect of an atmospheric pressure glow discharge on the surface properties of seeds of grain crops was studied. It is shown that plasma treatment allows us to significantly improve the contact properties of the seed surface and obtain significantly low values of contact wetting angles. The effect on the seed membrane of an unequal-spring plasma glow discharge of atmospheric pressure leads to a modification of the seed surface, which consists in the development of a fine-mesh network on the seed surface, with an increase in exposure time or discharge power, the etching effect on the seed surface increases, but the seed germination rate does not increase with the intensification of processing parameters.

Keywords: plasma modification, glow discharge at atmospheric pressure, seeds, wheat, germination.

REFERENCES

1. M. Dhayal, S. Y. Lee, and S. U. Park, *Vacuum* **80**, 499 (2006).
2. M. Selcuk, L. Oksuz, and P. Basaran, *Bioresource Technology*, **99**, 5104 (2008).
3. J. C. Volin, F. D. Denes, R. A. Young, and S. M. T. Park, *Crop Science* **40**, 1706 (2000).
4. S. Lynikiene, and G. R. Pozeliene, *Int. Agrophys.* **20**, 195 (2006).
5. I. F. Borodin, and K. N. Shcherbakov, *Mach. Agric.* **5**, 35 (1998).
6. I. Palov, *Mach. Agric.* **15**, 10 (2003).
7. B. Sera, V. Stranak, M. Sery, M. Tichy, and P. Spatenka, *Plasma Science and Technology* **10**, 506 (2008).
8. B. Sera, P. Spatenka, M. Sery, N. Vrchotova, and I. Hruskova, *IEEE Transactions on Plasma Science* **38**, 2963 (2010).
9. S. Zivkovic, N. Puac, Z. Giba, D. Grubisic, and Z. Lj. Petrovic, *Seed Science and Technology* **32**, 693 (2004).
10. D. Dobrin, M. Magureanu, N. B. Mandache, M.-D. Ionita, *Innov Food Sci Emerg Technol.* **29**, 255 (2015).
11. S. Lynikiene, A. Pozeliene, and G. Rutkauskas, *International Agrophysics* **20**, 195 (2006).
12. B. Sera, M. Sery, V. Stranak, P. Spatenka, and M. Tichy, *Plasma Science and Technology* **11**, 750 (2009).
13. A. Mitra, Y. F. Li, T. G. Klämpfl, T. Shimizu, J. Jeon, G. E. Morfill, and J. L. Zimmermann, *Food Bioprocess Technol.* **7**, 645 (2014).
14. J. Jiang, X. He, L. Li, J. Li, H. Shao, Q. Xu, R. Ye, and Y. Dong, *Plasma Sci Technol.* **16**, 54 (2014).
15. B. B. Baldanov, and Ch. N. Norboev, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 93 (2009).
16. B. B. Baldanov, and Ts. V. Ranzhurov, *Technical Physics* **59** (4), 621 (2014).
17. Yu. S. Akishev, A. A. Deryugin, V. B. Karal'nik, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, and N. I. Trushkin, *Plasma Physics Reports* **20**, 511 (1994).
18. Yu. S. Akishev, M. E. Grushin, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, M. V. Pan'kin, and N. I. Trushkin, *Plasma Physics Reports* **26**, 157 (2000).
19. G. N. Dandaron, B. B. Baldanov, *Plasma Phys. Rep.*, **33**, 243 (2007).
20. E. P. Velikhov, V. S. Golubev, S. V. Pashkin, *Sov. Phys. Usp.* **25**, 340 (1982).
21. A. Zahoranová, M. Henselová, D. Hudecová, B. Kaliňáková, D. Kováčik, V. Medvecká, M. Černák, *Plasma Chem. Plasma Process.* **36**, 397 (2016).
22. I. Filatova, V. Azharonoki, V. Lushkevich, A. Zhukovsky, G. Gadzhieva, K. Spasic, in *Proc. 31st Int. Conf. Phenom. Ioniz. Gases (ICPIG)* (Granada, Spain, 2013).
23. L. K. Randeniya and G. J. J. B. de Groot, *Plasma Processes and Polymers* **12**, 608 (2015).
24. E. Bormashenko, R. Gryniov, Y. Bormashenko, and E. Drori, *Sci. Rep.* **2**, 741 (2012).
25. M. Henselova, L. Slovakova, M. Martinka, and A. Zaharanova, *Biologia* **67**, 490 (2012).
26. I. Filatova, V. Azharonoki, V. Lushkevich, A. Zhukovsky, G. Gadzhieva, and K. Spasic, in *Proc. 31st Int. Conf. Phenom. Ioniz. Gases (ICPIG)* (Granada, Spain, 2013).