# ——— ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПЛАЗМОХИМИИ ———

УДК 537.523.9:532.64.08

# ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ

© 2022 г. Б. Б. Балданов<sup>а,</sup> \*, Ц. В. Ранжуров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670031 Россия \*E-mail: baibat@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г. После доработки 16.03.2022 г. Принята к публикации 18.03.2022 г.

Показано, что в результате воздействия нетермической плазмы тлеющего разряда атмосферного давления на поверхность семян, поверхность становится гидрофильной и характеризуется снижением контактного угла смачивания, возрастанием поверхностной энергии и увеличением шероховатости поверхности. Установлено, что изменение морфологии и шероховатости поверхности семян в результате плазменного воздействия связано с возникновением на поверхности семян регулярной мелкоячеистой сетчатой структуры с различным размером ячеек и с довольно резко очерченными границами.

*Ключевые слова:* нетермическая плазма, тлеющий разряд атмосферного давления, плазменная модификация, семена пшеницы

DOI: 10.31857/S0023119322040039

# введение

В последнее время низкотемпературная неравновесная плазма эффективно используется в сельском хозяйстве в качестве альтернативы традиционной предпосевной обработке семян [1–3]. Использование плазменных технологий имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями, такие как равномерность обработки, сохранение целостности семян, отсутствие необходимости использования химических препаратов [1–5].

Для стимуляции прорастания семян и роста растений используются различные типы источников нетермической неравновесной плазмы, которые создаются на основе коронного разряда [6], ВЧ-разряда низкого давления [1, 5, 7, 8], микроволнового разряда [9–11] и других источников плазмы [6, 12, 13].

В [1–3, 8, 10] показано влияние плазменной предпосевной обработки на скорость прорастания семян, а также на дальнейший рост и развитие растений. При этом наблюдается значительное увеличение скорости прорастания семян, обработанных в плазме по сравнению с контрольной группой (необработанные семена) [1, 6, 11]. Например, при воздействии высокочастотной плазмы аргона в течение 130 мин наблюдается увеличение всхожести семян *Carthamus tinctorium* на 50% [1]. В [11] в результате обработки семян *Chenopodium album* микроволновым разрядом наблюдалось трехкрат-

ное увеличение всхожести семян. В ряде исследований показано, что плазменная обработка семян представляет собой эффективный способ стерилизации, способный инактивировать широкий спектр микроорганизмов на поверхности семян, а также на хранящихся пищевых субстратах [4, 9, 14, 15].

Одним из возможных объяснений механизма улучшения прорастания и роста семян растений за счет воздействия плазмы является то, что плазменная обработка вызывает структурные изменения на поверхности семян [1, 5, 16]. В [5] отмечалось, что химические реакции на поверхности семян, инициированные плазменным воздействием, оказывают сильное влияние на прорастание семян. В [17, 18] показано, что плазменная обработка семян улучшает смачиваемость поверхности семян, что, в свою очередь, приводит к увеличению всхожести семян.

Целью данной работы является изучение воздействия нетермической неравновесной плазмы тлеющего разряда атмосферного давления на смачиваемость поверхности зерновых культур.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлена фотография источника объемной нетермической (холодной) плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления (ТРАД) [19].



**Рис 1.** Плазменная обработка семян пшеницы в ТРАД. Межэлектродное расстояние d = 2 см.

Тлеющий разряд инициируется в электродной конструкции между плоским металлическим анодом и острийными катодами. Протяженность разрядного промежутка от вершины острий до плоскости анода составляет 2 см. Плоский анод представляет собой металлическую пластину площадью 672 см<sup>2</sup>. Острийные катоды ориентированы нормально плоскости анода, объединены в четыре секции на площади 420 см<sup>2</sup> и нагружены на балластные сопротивления. Лиаметр острийных катодов 1.5 мм. Радиус закругления торцевых срезов катодов составлял 50 мкм. Для стабильного зажигания и устойчивого горения тлеющего разряда каждый острийный катод нагружался регулируемым в диапазоне 1-9 МОм балластным сопротивлением [20]. Плазмообразующий газ аргон нагнетался перпендикулярно острийным катодам и направлению электрического тока пробиваемого разрядного промежутка. Устойчивость разряда относительно перехода отрицательной короны в искровой пробой разрядного промежутка достигается слабой прокачкой аргона через разрядный промежуток. Скорость прокачки на входе в разрядный промежуток 0.45-2.24 м/с. Расход нагнетаемого аргона 5  $\times$  10<sup>-5</sup> кг/с. Разряд зажигался от регулируемого высоковольтного источника питания ВС-20-10 с выходным напряжением до 20 кВ.

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 как контроль. Семена равномерно распределялись по поверхности плоского анода, при этом семена не касались друг друга, и подвергались воздействию плазмы с различной экспозицией.

Изменение свойств поверхности характеризовали значениями краевых углов смачивания θ, которые определяли по методу лежащей капли с помощью микроскопа по воде (бидистилляту). Величины углов смачивания определялись с помощью программного пакета DropSnake — LB-ADSA [21]. Поверхностная энергия рассчитывалась с использованием уравнения Неймана [22]. Топография поверхности семян исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM TM-1000 с системой микроанализа Hitachi TM-1000.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для характеристики воздействия нетермической плазмы ТРАД на гидрофобность поверхности семян пшеницы использовались величины краевого угла смачивания θ, определенные по воде (рис. 2).

Исходная поверхность семени пшеницы характеризуется сравнительно высокими значениями угла смачивания  $\theta = 107^{\circ}$  (по воде), и низкой поверхностной энергией  $\gamma$  (рис. 3). В результате воздействия нетермической плазмы ТРАД на семена, их поверхность становится гидрофильной, и характеризуется существенным снижением контактного угла смачивания  $\theta$  (рис. 2), при этом значительно возрастает поверхностная энергия  $\gamma$  (рис. 3).

Топография поверхности семян до и после плазменной обработки в ТРАД представлена на рис. 4.

Поверхность семян пшеницы в контрольной группе (рис. 4а) представляет собой достаточно ровную и гладкую поверхность. После плазменной обработки на поверхности семян наблюдаются значительные изменения (рис. 4б). Как видно, воздействие плазмы на семена пшеницы приводит к увеличению шероховатости поверхности по сравнению с контрольной группой семян. Изменение морфологии и шероховатости поверхности семян в результате плазменного воздействия связано с возникновением на поверхности семян регулярной мелкоячеистой сетчатой структуры, с различным размером ячеек и с довольно резко очерченными границами. При увеличении длительности воздействия или мощности разряда эффекты травления на поверхности семени усиливаются (рис. 4в, 4г).

Аналогичные результаты получены в [1, 11, 16], где представлены экспериментальные доказательства травления поверхности оболочки семян, вызванного плазменной обработкой. Исследование толщины оболочки семян после плазменной



**Рис. 2.** Зависимость контактного угла от величины разрядного тока *I*. Время экспозиции t = 60 с.



**Рис. 3.** Влияние плазменной обработки на свободную поверхностную энергию  $\gamma$  семян пшеницы. Время экспозиции t = 60 с.

обработки показало, что обработка эффективно удаляет очень тонкий липидный слой, который делает семена водоотталкивающими, и, вероятно, уменьшает длину (средний молекулярный вес) цепей биополимеров, составляющих оболочку семян, тем самым обеспечивая лучший транспорт воды через оболочку семян, улучшая прорастание [17]. Наличие шероховатости на поверхности семян после плазменной обработки приводит к возникновению так называемого "эффекта лепестка розы" [7] (рис. 5).

Видно, что сформированная капля прочно удерживается на вертикальной поверхности семени (рис. 5в), а также может быть подвешенной

312



**Рис. 4.** Микрофотография поверхности семени пшеницы. Увеличение ( $\times$ 300). а – контроль (необработанная поверхность); после плазменной обработки в ТРАД: 6 – I = 0.1 мА; в – I = 0.3 мА; г – I = 0.5 мА; Время экспозиции t = 30 с.



Рис. 5. "Эффект лепестка розы" на поверхности семени пшеницы.

к твердой поверхности снизу (рис. 5д), в этом случае говорится о супергидрофобности с "эффектом лепестка розы" ("rose petal") [23–25]. Такая картина, при которой супергидрофобное состояние одновременно обладает и высокими адгезивными свойствами, является характерным для "эффекта лепестка розы". При "эффекте лепестка розы" капли как бы "пришпилены" (pinning, sticking) к поверхности [23, 26].

Механизм, ответственный за влияние плазмы на скорость прорастания семян и рост растений, до сих пор остается дискуссионным. Это связано с тем, что семена являются чрезвычайно сложным биологическим объектом, и воздействие плазмы на семена может происходить несколькими путями [27]: путем изменения поверхностного слоя семян за счет реакций с участием электронов, ионов и активных радикалов, ультрафиолетовое излучение плазмы и др. [10]. С другой стороны, параметры плазменной обработки, такие как свойства плазмы, мощность, состав и давление рабочего газа, также оказывают значительное влияние на реакцию зародышей при воздействии плазмы. Одним из важнейших факторов плазменной обработки является время обработки. Так, при кратковременном воздействии плазмы наблюдается незначительное влияние на прорастание и рост семян, в то же время значительное увеличение продолжительности воздействия отрицательно сказывается на семенах [7, 13, 18].

В ряде исследований отмечается, что плазменная обработка вызывает изменения на поверхности семян [7, 13, 28]. В [8, 16] наблюдались поверхностные изменения в результате плазменной обработки поверхности семян пшеницы. Микрофотографии, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, показывают, что после воздействия плазмы поверхность семян травится. Аналогичный эффект был обнаружен в [27] при плазменной обработке семян пшеницы. В [1] показана "рыхлая" структура поверхности семян после воздействия радиочастотной плазмы. Изменение поверхностных свойств семян после плазменной обработки может усилить транспорт кислорода и воды через семенную мембрану [1, 7, 27]. Было обнаружено [27], что увеличение количества воды в семенах пшеницы, фасоли и чечевицы происходило после воздействия плазмы (по сравнению с контрольными образцами).

## выводы

В данной работе изучено изменение поверхностных свойств семян пшеницы при воздействии нетермической плазмы тлеюшего разряда атмосферного давления. В результате воздействия нетермической плазмы ТРАД на поверхность семян, поверхность становится гидрофильной, и характеризуется существенным снижением контактного угла смачивания  $\theta$ . При этом значительно возрастает поверхностная энергия у, увеличивается шероховатость поверхности по сравнению с контрольной группой семян. Изменение морфологии и шероховатости поверхности семян в результате плазменного воздействия связано с возникновением на поверхности семян регулярной мелкоячеистой сетчатой структуры с различным размером ячеек и с довольно резко очерченными границами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Dhayal M., Lee S.Y., Park, S.U.* // Vacuum. 2006. V. 80. P. 499.
- Dobrin D., Magureanu M., Mandache N.B., et al. // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2015. V. 29. P. 255.
- Zahoranova A., Henselova M., Hudecova D., et al. // Plasma chemistry and plasma process. 2016. V. 36. P. 397.
- Selcuk M., Oksuz L., Basaran P. // Bioresource Technology. 2008. V. 99. P. 5104.
- Volin J.C., Denes F.D., Young R.A., et al. // Crop Science. 2000. V. 40. P. 1706.
- Lynikiene S., Pozeliene A., Rutkauskas G. // International Agrophysics. 2006. V. 20. P. 195.
- Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., et al. // Scientific Reports. 2012. V. 2. P. 741.
- 8. *Kitazaki S., Koga K., Shiratani M., et al.* // Japanese Journal of Applied Physics. 2012. V. 51. 01AE01.

- 9. *Basaran P., Akhan U. //* Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2010. V. 11. P. 113.
- 10. Sera B., Spatenka P., Sery M., et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. P. 2963.
- 11. Sera B., Stranak V., Sery M., et al. // Plasma Science and Technology. 2008. V. 10. P. 506.
- 12. Zivkovic S., Puac N., Giba Z., et al. // Seed Science and Technology. 2004. V. 32. P. 693.
- Henselova M., Slovakova L., Martinka M., et al. // Biologia. 2012. V. 67. P. 490.
- 14. Deng X., Shi J., Kong M.G. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2006. V. 34. P. 1310.
- Jung H., Kim D.B., Gweon B., et al. // Applied Catalysis B. 2010. V. 93. P. 212.
- 16. *Baldanov B.B., Ranzhurov Ts.V., Sordonova M.N., et al.* // Plasma Physics Reports. 2020. V. 46. P. 110.
- 17. Mitra A., Li Y.-F., Klampfl T.G., et al. // Food bioprocess technology. 2013. V. 7. P. 645.
- Jiang J., He X., Li L., et al. // Plasma Science and Technology. 2014. V. 16. P. 54.
- 19. *Baldanov B.B., Ranzhurov T.V.* // Technical physics. 2014. V. 59. P. 621.
- Akishev Y.S., Grushin M.E., Kochetov I.V., et al. // Plasma Physics Reports. 2000. V. 26. P. 157.
- Stalder A.F., Melchior T., Müller M., et al. // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2010. V. 364. № 1. P. 72.
- 22. Deshmukh R.R., Shetty A.R. // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 107. P. 3707.
- Yan Y.Y., Gao N., Barthlott W. // Adv. Colloid and Interface Sci. 2011. V. 169. P. 80.
- Myint M.T.Z., Hornyak G.L., Dutta J. // J. Colloid Interface Sci. 2014. V. 415. P. 32.
- 25. *Guo Z., Liu W., Su. B.-L.* // J. Colloid Interface Sci. 2011. V. 353. P. 335.
- 26. Quere D. // Langmuir. 1998. V. 14. P. 2213.
- Filatova I., Azharonok V., Shik A., et al. // Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security NATO Science for Peace and Security, Ser. A: Chemistry and Biology. 2012. P. 469.
- 28. *Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B.* // Plasma Processes and Polymers. 2015. V. 12. P. 608.