

УДК 533.924:544.72

ВЛИЯНИЕ НЕТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ

© 2023 г. Б. Б. Балданов^а, *, Ц. В. Ранжуров^а

^а Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670031 Россия

*E-mail: baibat@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 14.07.2023 г.

Показано изменение поверхностных свойств семян пшеницы при воздействии нетермической плазменной струи атмосферного давления. После плазменной обработки поверхность семян пшеницы становится гидрофильной и характеризуется снижением контактного угла смачивания, повышением поверхностной энергии и увеличением водопоглощения семян.

Ключевые слова: нетермическая плазменная струя, пшеница, смачиваемость, контактный угол, микроструктура поверхности

DOI: 10.31857/S0023119323060025, **EDN:** PESCDP

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия к нетермической неравновесной плазме при атмосферном давлении, более распространенное название “холодная плазма атмосферного давления” (ХПАТ), наблюдается растущий интерес как в научном, так и в практическом аспекте [1–4]. Одним из перспективных направлений применения ХПАТ является сельское хозяйство, в частности, предпосевная обработка семян, которая позволяет значительно ускорить прорастание семян и рост проростков, уменьшить микробное загрязнение семян, улучшить водовпитывание семян [5–9].

Среди различных типов источников нетермической плазмы, особое место занимают источники на основе плазменных струй атмосферного давления (ПСАД), которые находят широкое применение для обработки термочувствительных поверхностей и биологических объектов [10–15]. Важным преимуществом ПСАД является способность инициировать широкий спектр химически активных частиц для активации поверхности материала [16–25].

В [26–28] установлено, что воздействие нетермической неравновесной плазмы на оболочку семян растений приводит к модификации поверхности семян. Микрофотографии, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, показывают, что после воздействия плазмы поверхность семян травится. Аналогичный эффект был обнаружен в [29–31] при плазменной обработке семян пшеницы. В [32] показана “рыхлая” структура поверхности семян после воздей-

ствия радиочастотной плазмы. Изменение поверхностных свойств семян после плазменной обработки позволяет усилить транспорт кислорода и воды через семенную мембрану [32, 26, 31]. Увеличение количества воды в семенах пшеницы, фасоли и чечевицы после воздействия плазмы на семя (по сравнению с контрольными образцами) показано в [31].

Целью данной работы является экспериментальное исследование воздействия нетермической плазменной струи атмосферного давления на смачиваемость поверхности семян пшеницы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Плазменная обработка семян проводилась с использованием источника нетермической плазмы на основе плазменных струй атмосферного давления (рис. 1), конструкция источника детально описана в [33].

Источник нетермической плазменной струи (диаметр плазменной струи составляет 2.5 см, длина струи 1–2 см, расход газа $G < 15 \times 10^{-3}$ кг/с, температура аргонового факела составляет 18–20°C фиксируется на одинаковом расстоянии над поверхностью 9 чашек, диаметр каждой из которых составляет $D = 3.5$ см. В каждой чашке равномерно в один слой размещены по 20 семян. Расстояние между соплом генератора и дном чашек составляет $d = 1.5$ см.

Обработке подвергались семена яровой пшеницы сорта Бурятская остистая, селекции Бурятского НИИСХ. Были подготовлены несколько

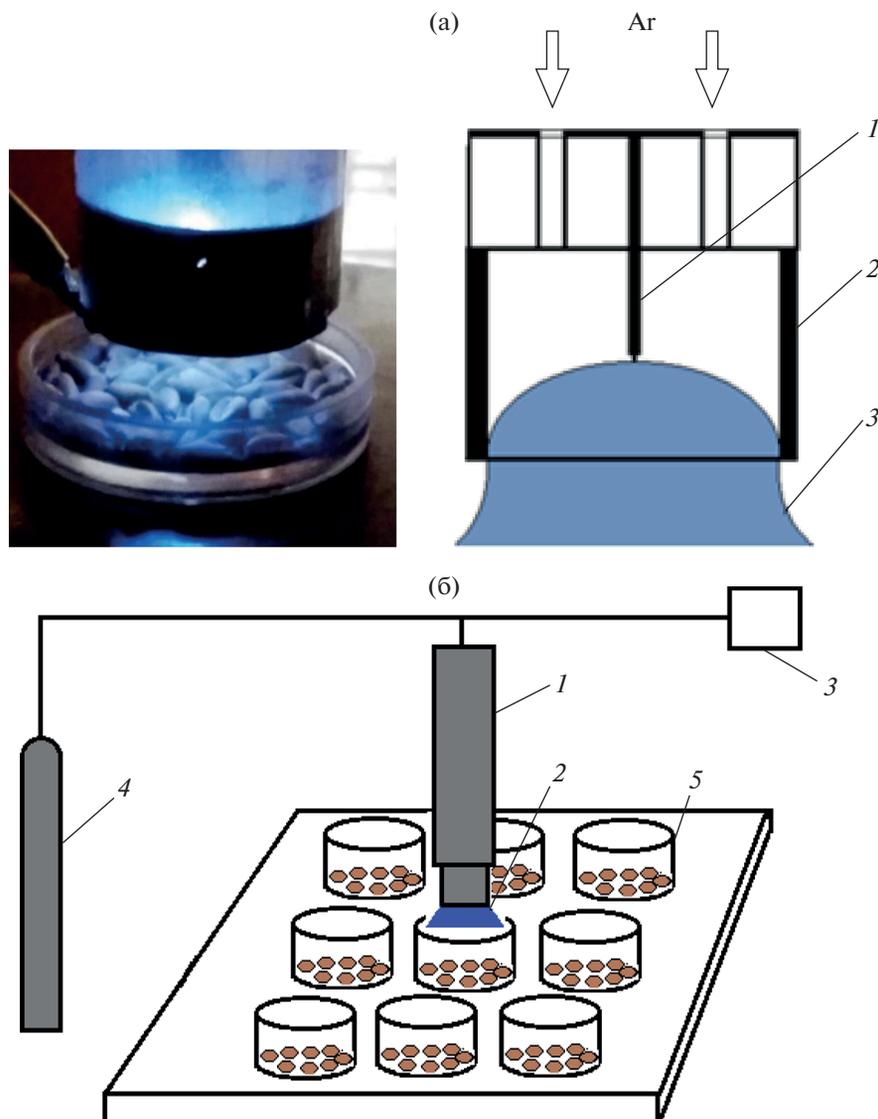


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. (а) Источник нетермической плазмы на основе плазменных струй: 1 – металлическое острие, 2 – цилиндрический анод; (б) схема эксперимента: 1 – источник плазмы, 2 – холодная плазма, 3 – источник питания, 4 – баллон газа (аргон), 5 – чашки с семенами.

партий семян, семена из одной партии были подвергнуты воздействию плазмы, в то время как семена из другой партии использовались как контроль.

Для исследования водопоглощения семян, семена замачивались в воде в чашках Петри. Для каждого измерения 30 семян делились на три части по 10 семян в каждой. Семена вынимались и взвешивались через каждые 0, 0,5, 1, 1,5, 2, 4, 6 ч. Масса поглощенной воды рассчитывалась как разница между увлажненными семенами и сухими.

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 по-

мощью программного пакета DropSnake – LB-ADSA [34]. Топография поверхности полимерных пленок исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM TM-1000 с системой микроанализа Hitachi TM1000. Поверхностная энергия рассчитывалась с использованием уравнения Неймана [35]. Топография поверхности семян исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM TM-1000 с системой микроанализа Hitachi TM-1000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена зависимость контактного угла θ от времени обработки t и мощности разряда.

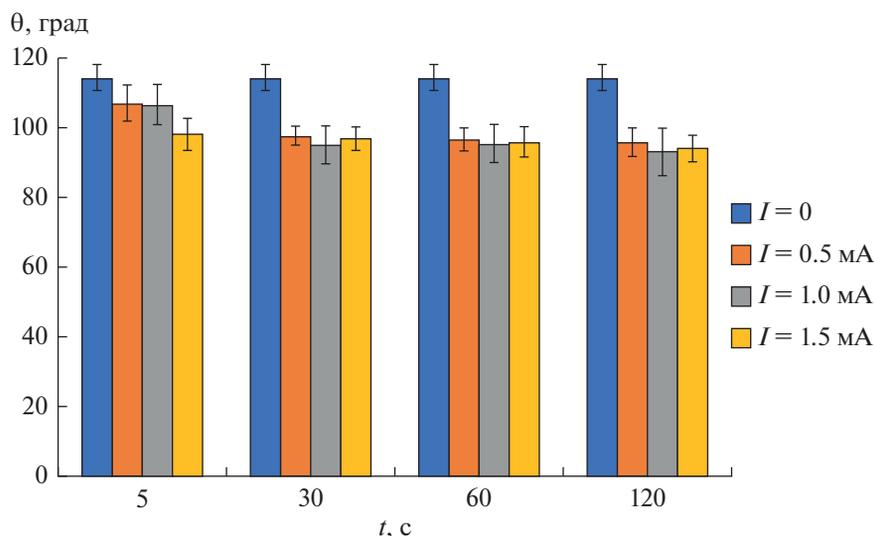


Рис. 2. Зависимость контактного угла θ от времени обработки t при различной мощности разряда.

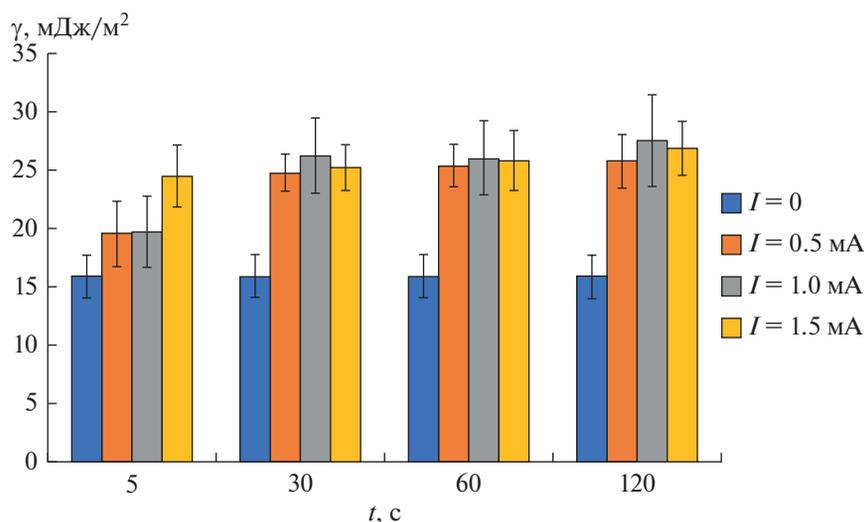


Рис. 3. Влияние плазменной обработки на свободную поверхностную энергию γ семян пшеницы.

Как видно, воздействие нетермической плазменной струи на поверхность семян пшеницы приводит к снижению контактного угла с $\theta = 114^\circ$ (контроль) до $\theta = 93.8^\circ$ после 120 с обработки. Необходимо отметить, что при увеличении мощности разряда наблюдается резкое снижение контактного угла θ при кратковременном ($t = 5$ с) воздействии плазменных струй на семена (рис. 2) и остается практически на одном уровне при увеличении времени обработки.

После плазменной обработки семян поверхностная энергия существенно увеличивается с $\gamma = 15.89$ мДж/м² (контроль) до $\gamma = 26.93$ мДж/м² (рис. 3), что связано с увеличением гидрофильно-

сти поверхности, а также с ростом эффективной площади контакта.

На рис. 4 представлены изображения поверхности семян пшеницы до (рис. 4а) и после плазменной обработки (рис. 4б).

Поверхность семян пшеницы в контрольной группе (рис. 4а) представляет собой достаточно ровную и гладкую поверхность. Воздействие нетермической плазменной струи на поверхность семян приводит к формированию на поверхности семян регулярной мелкоячеистой сетчатой структуры, с различным размером ячеек с довольно резко очерченными границами [36, 37]. В [38] показано, что скорость прорастания и рост растений после плазменной обработки связаны с воз-

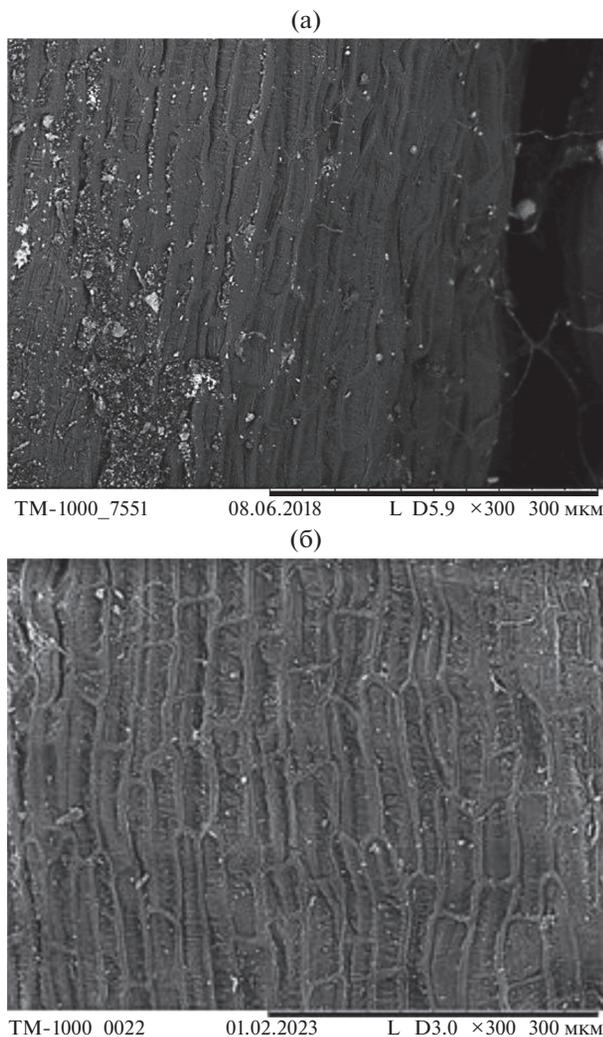


Рис. 4. Микрофотография поверхности семени пшеницы. Увеличение ($\times 300$). (а) Контроль (необработанная поверхность); (б) после плазменной обработки. Ток разряда $I = 1$ мА; время экспозиции $t = 5$ с. Масштаб 300 мкм.

действием плазмы на структуру тканей, которое приводит к улучшению транспорта основных веществ через каналы, индуцированные на клеточных мембранах.

Снижение контактного угла θ коррелирует с увеличением скорости поглощения воды (рис. 5).

В [36] показано, что изменения на поверхности семян, вызванные влиянием нетермической плазмы, связаны с эрозией оболочки семян. Воздействие нетермической плазмы приводит к появлению трещин на поверхности зерен пшеницы, что значительно улучшает поглощение воды, и как следствие, способствует ускорению прорастания [39, 40]. Аналогичный эффект травления поверхности семян, приводящий к улучшению водопоглощающей способности представлен в [41].

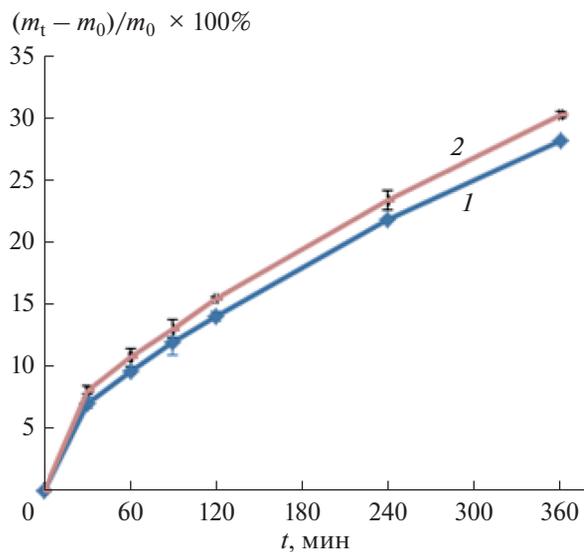


Рис. 5. Зависимость поглощения воды в контрольной группе семян (1) и в семенах пшеницы после плазменной обработки (2). 1 – контроль; 2 – семена после плазменной обработки: $I = 1.5$ мА, $t = 60$ с.

ВЫВОДЫ

При воздействии нетермической плазменной струи атмосферного давления на семена пшеницы наблюдается модификация поверхностных свойств семян, проявляющаяся формированием на поверхности семян регулярной мелкоячеистой сетчатой структуры, с различным размером ячеек с довольно резко очерченными границами. После плазменной обработки поверхность семян становится гидрофильной и характеризуется существенным снижением контактного угла смачивания θ , при этом значительно возрастает поверхностная энергия γ и увеличивается поглощение воды семенами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tendero C., Tixier C., Tristant P., et al.* // Spectrochim. Acta B. 2006. V. 61. P. 2.
2. *Nehra V., Kumar A., Dwivedi H.K.* // Int. J. Eng. 2008. V. 2. P. 53.
3. *Schutze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P. 1685.
4. *Lu X., Laroussi M., Puech V.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. P. 1.
5. *Jiang J., He X., Li L., et al.* // Plasma Sci. Technol. 2014. V. 16. P. 54.
6. *Zhao C., Piao S., Huang Y., et al.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 13530.
7. *Zahoranová A., Henselová M., Hudecová D., et al.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2016. V. 36. P. 397.
8. *Dobrin D., Magureanu M., Mandache N.B., et al.* // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2015. V. 29. P. 255.

9. *Bormashenko E., Shapira Y., Grynyov R., et al.* // *J. Exp. Bot.* 2015. V. 66. P. 4013.
10. *Moisan M., Barbeau J., Moreau S., et al.* // *Int. J. Pharm.* 2001. V. 226. P. 1.
11. *Liu H.X., Chen J.R., Yang L.Q., et al.* // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 254. P. 1815.
12. *Zhang X., Huang J., Liu X. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 105(6). P. 063302.
13. *Deng X.T., Shi J.J., Chen H.L., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90(1). P. 013903.
14. *Ji Y.Y., Hong Y.C., Lee S.H., et al.* // *Surf. Coat. Technol.* 2008. V. 202 (22–23). P. 5663.
15. *Shashurin A., Keidar M., Bronnikov S., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93(18) P. 181501.
16. *Hong Y.C., Uhm H.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89(22). P. 221504.
17. *Kolb J.F., Mohamed A.A.H., Price R.O., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 1.
18. *Lu X.P., Jiang Z.H., Xiong Q., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 081502.
19. *Hong Y.C., Uhm H.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 221504.
20. *Zhang X., Li M., Zhou R., et al.* // *Applied Phys. Lett.* 2008. V. 93. P. 021502.
21. *Hong Y.C., Uhm H.S., Yi W.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. P. 051504.
22. *Nie Q.Y., Ren C.S., Wang D.Z., et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. P. 011503.
23. *Hong Y.C., Cho S.C., Kim J.H., et al.* // *Phys. Plasmas.* 2007. V. 14. P. 074502.
24. *Hong Y.C., Cho S.C., Uhm H.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 141501.
25. *Lotfy K* // *J. Mod. Phys.* 2017. V. 8. P. 1901.
26. *Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., et al.* // *Scientific Reports.* 2012. V. 2. P. 741.
27. *Henselova M., Slovakova L., Martinka M., et al.* // *Biologia.* 2012. V. 67. P. 490.
28. *Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B.* // *Plasma Processes and Polymers.* 2015. V. 12. P. 608.
29. *Kitazaki S., Koga K., Shiratani M., et al.* // *Japanese Journal of Applied Physics.* 2012. V. 51. 01AE01.
30. *Baldanov B.B., Ranzhurov Ts.V., Sordonova M.N., et al.* // *Plasma Physics Reports.* 2020. V. 46. P. 110.
31. *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.
32. *Dhayal M., Lee S.Y., Park S.U.* // *Vacuum.* 2006. V. 80. P. 499.
33. *Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В.* // *Приборы и техника эксперимента.* 2019. № 3. С. 130.
34. *Stalder A.F., Melchior T., Müller M., et al.* // *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.* 2010. V. 364. № 1. P. 72.
35. *Deshmukh R.R., Shetty A.R.* // *Journal of Applied Polymer Science.* 2008. V. 107. P. 3707.
36. *Šerá B., Špatenka P., Šerý M., et al.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. V. 38. P. 2963.
37. *Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В.* // *Химия высоких энергий.* 2022. Т. 56. № 4. С. 310.
38. *Zahoranova A., Henselova M., Hudcova D., et al.* // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 36. P. 397.
39. *Adebe A.T., Modi A.T.* // *Res. J. Seed Sci.* 2009. V. 2. P. 23.
40. *Lee K.H., Kim H.-J., Woo K.S., et al.* // *LWT – Food Sci. Technol.* 2016. V. 73. P. 442.
41. *Ulbin-Figlewicz N., Brychcy E., Jarmoluk A.* // *J. Food Sci. Technol.* 2015. V. 52. P. 1228.