

УДК 537.528

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-84-90

EDN: LPMKQE

PACS: 52.80. Wg, 82.33.Xj



Получение фитоактивных продуктов путем газоразрядной обработки водной суспензии хитозана

И. К. Наумова, В. А. Титов, А. В. Хлюстова, А. В. Агафонов

Представлены результаты плазмохимической обработки водной суспензии хитозана и показано влияние полученных продуктов на всхожесть семян гороха и на раннее развитие растений. Исследовано действие разряда постоянного тока в воздухе с использованием в качестве катода обрабатываемой суспензии, а также разряда в парогазовых пузырьках у поверхности электрода, погруженного в суспензию («подводного» разряда). Определены скорости накопления водорастворимых продуктов и их энергетические выходы. Показано, что использование модифицированных суспензий увеличивает всхожесть семян и скорость начального развития растений при посеве в грунт.

Ключевые слова: плазма, подводный разряд, хитозан, модифицирование, обработка семян, всхожесть.

Введение

Одно из перспективных направлений применения низкотемпературной плазмы связано с повышением эффективности производства, первичной переработки и хранения продукции растениеводства. Многочисленные публикации по этому направлению представлены в обзорных работах [1–8]. Найдено, что предпосевная обработка семян плазмой атмосферного или пониженного давления, а также использование воды после плазменной обра-

ботки (PAW – «plasma activated water») улучшают всхожесть и ускоряют раннее развитие растений. Улучшение всхожести при использовании PAW отмечено для пшеницы [9, 10], ржи и циннии однолетней [11], ячменя [12, 13], фасоли золотистой (бобов мунг) [14], сои [15], картофеля [16], чечевицы [17], огурцов [18] и ряда других сельскохозяйственных культур. Ускоренный рост шпината, редиса и клубники при поливе водой после обработки плазмой показан в работе [19]. Было установлено, что использование PAW в разной степени влияет на скорость роста различных культур: редис, перец, томаты, бобы, цинния [20].

Значительно менее изучены возможности применения плазмы для получения фитостимуляторов из природных соединений, например, хитозана. Известно, что высокомолекулярный хитозан практически не растворим в воде, но его водорастворимые производные (хитоолигосахариды) с молекулярной массой $M \leq 10$ кДа стимулируют развитие сельскохозяйственных растений, усиливают биохимические механизмы их защиты от патогенных микроорганизмов и повышают устойчивость к неблагоприятным факторам среды [21, 22].

Наумова Ирина Константиновна¹, доцент, к.х.н.
E-mail: irinauma@mail.ru

Титов Валерий Александрович², г.н.с., д.ф.-м.н.
E-mail: titov25@gmail.com

Хлюстова Анна Владимировна², н.с., к.х.н.

Агафонов Александр Викторович², зав. отделом, д.х.н.

¹ Ивановский государственный университет.
Россия, 153025, Иваново, ул. Ермака, 39.

² Институт химии растворов им. Г. А. Крестова
Российской академии наук.

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

Статья поступила в редакцию 25.08.2023

Принята к публикации 5.09.2023

© Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В.,
Агафонов А. В., 2023

Получить низкомолекулярные производные хитозана можно обработкой его порошка в электронно-пучковой плазме [23, 24] или газоразрядной обработкой его растворов в разбавленных кислотах [25–33]. Показано, что полученные продукты обладают фитостимулирующими свойствами [18, 23, 24, 26, 33].

Необходимо отметить, что обработка хитозана в кислых средах требует последующей нейтрализации растворов и отделения водорастворимых фракций, что удлиняет процесс получения продуктов и увеличивает расход реактивов. В связи с этим более привлекательной для агротехнических применений представляется обработка водных суспензий хитозана без использования дополнительных реагентов.

Целью данной работы было получение модифицированного хитозана, включая его водорастворимые низкомолекулярные фракции, в одностадийном процессе путем газоразрядной обработки водных суспензий, а также испытание полученных продуктов в качестве стимуляторов всхожести семян и раннего развития гороха.

Методики экспериментов

Схемы установок показаны на рис. 1. В экспериментах использовали два типа газовых разрядов, контактирующих с жидкостью. Первый – разряд постоянного тока, который возбуждали в воздухе при атмосферном давлении между графитовым стержнем (анодом) и водной суспензией хитозана, которая исполняла роль катода (рис. 1а). Разряд горел при межэлектродном зазоре 4 мм, напряжении 1080 В и токе 50 мА. Второй тип разряда (так называемый «подводный» разряд) генерировали, подавая переменное напряжение ($U \leq 2$ кВ, $f = 50$ Гц) на графитовые электроды диаметром 6 мм, помещенные в стеклянные трубки и погруженные в суспензию, как показано на рис. 1б. Ток замыкался через торцы электродов, не закрытые стеклом. Разряд возникал в парогазовых пузырьках, которые формировались у торцов электродов за счет окислительно-восстановительных процессов и перегрева жидкости.

Частоту и длительность разрядных импульсов, амплитудные и средние значения то-

ка и напряжения, а также рассеиваемую мощность определяли по осциллограммам тока и напряжения на электродах, которые регистрировали с помощью цифрового осциллографа OWON PDS 5022C и многоканального аналого-цифрового преобразователя «Measurement minilab 1008». Подробнее схемы установок и методики контроля параметров разрядов описаны в [26].

Суспензии готовили путем диспергирования навески хитозана массой $m_0 = 4$ г в 400 мл дистиллированной воды с использованием ультразвуковой ванны «Stegler 3DT». Использовали хитозан (поли[(1→4)-2-амино-2-дезоксид-β-D-глюкозу]) производства ЗАО «Биопрогресс» (Россия) с исходной молекулярной массой 195 кДа и степенью деацетилирования 0,82. Суспензии обрабатывали разрядами в течение 4–20 минут при постоянном перемешивании магнитной мешалкой.

После обработки нерастворимый хитозан отделяли фильтрованием и высушивали в термостате при температуре 40 °С до постоянной массы (m_t). Разницу масс исходной навески и сухого нерастворимого хитозана после обработки ($m_{ws} = m_0 - m_t$) рассматривали как суммарную массу всех полученных водорастворимых продуктов. Выходы продуктов рассчитывали по соотношению $Y_{ws} = (m_{ws}/m_0) \times 100$ (%).

Для оценки всхожести семян использовали методики, приведенные в [34]. Лабораторную всхожесть определяли, проращивая семена в чашках Петри при комнатной температуре на фильтровальной бумаге, увлажненной суспензией хитозана после газоразрядной обработки. Грунтовую всхожесть определяли при высевании семян в почву, которую предварительно увлажняли и затем ежедневно поливали модифицированной суспензией. В описываемых экспериментах использовали суспензию, модифицированную под действием подводного разряда, а для контроля – водопроводную воду без обработки. Перед применением суспензию разбавляли дистиллированной водой до суммарной концентрации продуктов деструкции и модифицирования хитозана 0,2 мас. %. Наблюдали за появлением и последующим развитием ростков, измеряя длину стеблей.

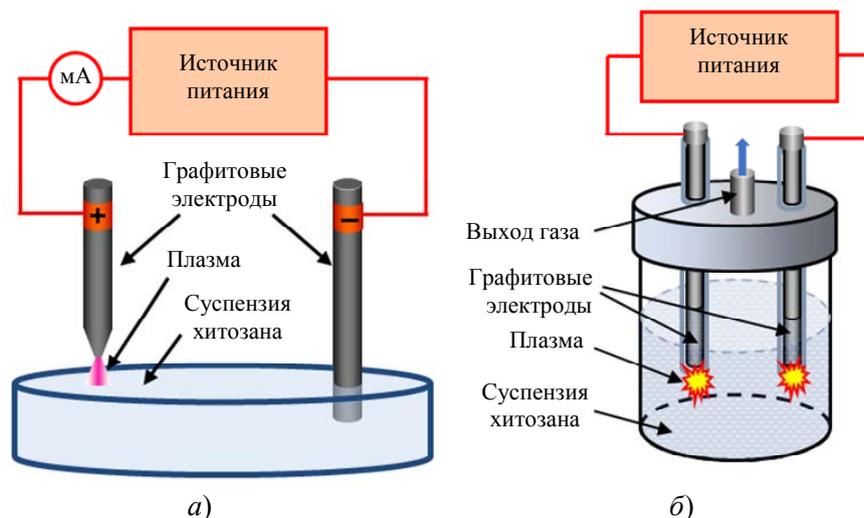


Рис. 1. Схемы установок: а) – разряд постоянного тока с жидким катодом (обрабатываемой суспензией); б) – подводный разряд

Результаты и их обсуждение

Типичные осциллограммы напряжения, тока и интенсивности излучения при горении подводного разряда приведены нами в работе [35]. Длительность и частота следования импульсов зависят от приложенного напряжения и от времени горения разряда, что связано с нагревом и изменением электропроводности жидкости. Стационарные значения частоты достигаются примерно после 3 минут протекания тока через разрядную ячейку. При использованных в наших экспериментах амплитудных значениях напряжения на электродах 300 ± 40 В максимальные значения тока составляли 90 ± 20 мА, частота следования импульсов разряда ~ 10 с⁻¹, средняя рассеиваемая в ячейке мощность – около 100 Вт, а средняя энергия одиночных разрядов $\sim 1,5 \pm 0,5$ Дж. Необходимо отметить, что в разрядах рассеивалось около 30 % энергии, вкладываемой в ячейку, остальная энергия расходовалась в виде джоулевых потерь в жидкой фазе.

На рисунке 2 показана зависимость массы водорастворимых продуктов от времени обработки суспензий. Скорости накопления продуктов составили $8,43 \pm 0,76$ мг/мин для разряда в воздухе и $6,50 \pm 0,87$ мг/мин для подводного разряда, а выходы за 20 мин обработки – 4,2 и 3,3 масс. % соответственно. Эти величины ниже полученных ранее при плазменной обработке 1%-ных растворов хитозана в разбавленной уксусной кислоте: 24,4 % для разряда постоянного тока в воздухе и 12,8 % для подводного разряда [26]. Высокие выходы

низкомолекулярных продуктов деструкции хитозана (более 80 %) достигаются при длительной обработке (120–300 мин) его растворов плазмой [29–31].

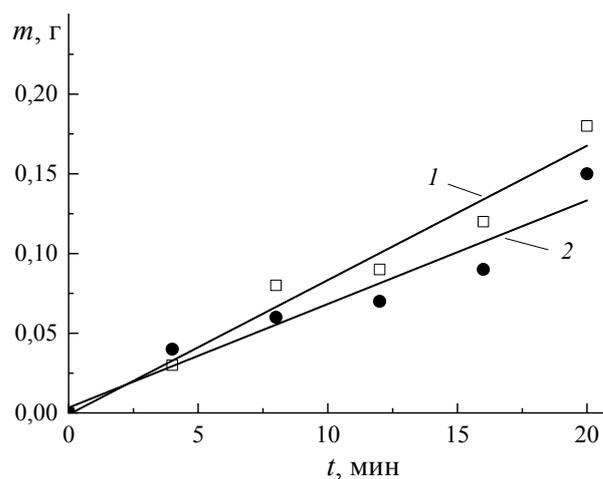


Рис. 2. Кинетика накопления водорастворимых продуктов деструкции хитозана при обработке водных суспензий разрядом постоянного тока в воздухе (1) и подводным разрядом (2)

Отношение скорости накопления водорастворимых продуктов (dm_{ws}/dt) к рассеиваемой в разряде мощности (P) дает оценку энергетического выхода: $Y = (dm_{ws}/dt)/P$. В случае разряда постоянного тока в воздухе энергетический выход продуктов составил примерно 2,8 мг/кДж, а при горении подводного разряда – 8,3 мг/кДж при учете только энергии, рассеиваемой в разряде. Если учитывать все потери энергии, то выход получается ниже ($Y = 2,7$ мг/кДж). Данные по затратам энергии на получение водорастворимого хитозана различными способами, включая гидролиз, фото-

деструкцию с использованием катализатора (TiO₂), реактива Фентона или энзимов, а также обработку его раствора плазмой барьерного разряда, представлены в работе [28]. Согласно этим данным, предлагаемый нами процесс по энергетическому выходу уступает только процессам с использованием барьерного разряда и фотодеструкции с применением ультразвука и реактива Фентона.

Как и при обработке кислых растворов хитозана, действие плазмы на его водные суспензии сопровождалось накоплением в жидкой фазе пероксида водорода. При разряде в воздухе наблюдалось также накопление нитрит- и нитрат-ионов, но при действии подводного разряда без контакта плазмы с воздухом нитрат- и нитрит-ионы обнаружены не были, зарегистрировано только образование H₂O₂ (табл. 1).

Таблица 1

Концентрация ионов NO₃⁻, NO₂⁻ и пероксида водорода в жидкости после обработки суспензий плазмой

Время, мин	C(NO ₃ ⁻), ммоль/л	C(NO ₂ ⁻), ммоль/л	C(H ₂ O ₂), ммоль/л	
			Разряд в воздухе	Подводный разряд
4	1,12	12,52	0,77	0,65
8	5,73	5,34	0,78	0,69
12	6,77	6,38	0,78	0,73
16	7,87	6,83	0,79	0,75
20	8,77	6,85	0,8	0,85

Электронные спектры поглощения растворов после отделения нерастворимого хитозана содержат широкие неразрешенные полосы в УФ-области, которые свидетельствуют о присутствии окисленных продуктов деструкции (рис. 3). Наиболее вероятно, суммарное поглощение обусловлено суперпозицией полос, связанных с электронными переходами $n \rightarrow \pi^*$ –NH₂ в пиранозном кольце и $n \rightarrow \pi^*$ группы –C=O ацетамида ($\lambda_{\text{max}} = 219$ нм), а также полос –C=O с $\lambda_{\text{max}} = 265$ и 295 нм, связанных с окислительной деструкцией через разрывы β-(1,4)-гликозидных связей в макромолекулах хитозана [27, 28].

В таблице 2 приведены характеристики лабораторной всхожести гороха при использовании модифицированной под действием плазмы суспензии хитозана, а на рис. 4 – зависимость средней длины ростков от времени при выращивании в грунте. Для сравнения представлены данные, полученные с растворами низкомолекулярных фракций хитозана ($c = 0,2$ масс. %), а также с обработанной плазмой водой (PAW). Проращивание семян с

применением модифицированной суспензии дало всхожесть 89 % при 84%-ной всхожести в контрольной партии (с использованием обычной воды). Кроме того, можно отметить увеличение степени набухания семян с 230 до 258 %. Близкие значения всхожести и степени набухания достигаются и с применением раствора низкомолекулярных производных хитозана (табл. 2).

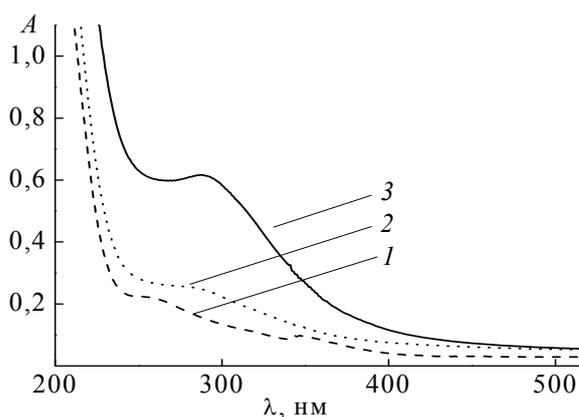


Рис. 3. Электронные спектры поглощения растворов после обработки плазмой подводного разряда в течение 4 (1), 8 (2) и 20 мин (3)

Таблица 2

Характеристики лабораторной всхожести гороха

Стимулятор	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Степень набухания, %
Контроль (вода)	8	84	230
PAW	12	85	242
0,2 % раствор хитозана	16	87	252
Суспензия хитозана	18	89	258

Данные, приведенные на рис. 4 и в табл. 3, показывают, что использование суспензии модифицированного хитозана, содержащей его водорастворимые фракции, заметно ускоряет только раннее развитие растений в течение первых 5 суток. В дальнейшем длина ростков увеличивается со скоростью, которая в пределах погрешности не зависит от использованного фитостимулятора. В то же время, полив модифицированной суспензией

способствует развитию листовой системы, на что указывает увеличение зеленой массы по сравнению с контрольными растениями (табл. 3). Ранее было показано, что использование растворов низкомолекулярного хитозана при поливе способствует выработке хлорофилла в листьях гороха, а кроме того, существенно уменьшает вероятность развития фитопатогенов (бактерий и грибов) на поверхности семян [29].

Таблица 3

Характеристики роста гороха при посадке в грунт

Стимулятор	Средняя скорость роста проростков, см/сутки		Зеленая масса (влажная), г	Зеленая масса (сухая), г
	1–5 сутки	5–22 сутки		
Контроль (вода)	$0,62 \pm 0,03$	$0,62 \pm 0,03$	10,3	1,9
PAW	$1,31 \pm 0,04$	$0,58 \pm 0,03$	13,1	2,1
0,2% раствор хитозана	$1,68 \pm 0,03$	$0,58 \pm 0,03$	14,2	2,4
Суспензия хитозана	$2,11 \pm 0,03$	$0,61 \pm 0,04$	15,1	2,6

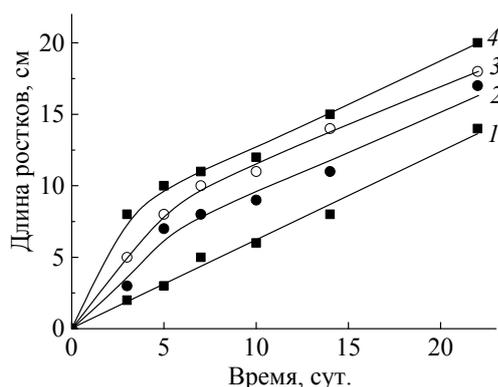


Рис. 4. Зависимость длины ростков от времени после посева гороха в грунт. 1 – контрольный эксперимент, (2–4) с использованием фитостимуляторов: 2 – PAW, 3 – раствора низкомолекулярного хитозана, 4 – суспензии модифицированного хитозана

Заключение

Таким образом, газоразрядная обработка водных суспензий позволяет без использования дополнительных реагентов получить модифицированный хитозан и его низкомолекулярные водорастворимые фракции. Применение разряда между электродами, погруженными в жидкость, не сопровождается заметным накоплением в ней нитратов и нитритов. На примере семян гороха показано, что модифицированная суспензия обладает фитостимулирующим действием: способствует увели-

чению всхожести и ускоренному начальному развитию проростков при посадке в грунт, а также ускоряет накопление зеленой массы растений. Предложенный способ получения фитостимулятора на основе хитозана представляется достаточно простым и менее затратным по сравнению с обработкой растворов хитозана в кислых средах с последующим отделением водорастворимых продуктов.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Rajan A., Boopathy B., Radhakrishnan M., Rao L., Schlüter O. K., Tiwari B. K. / Sustainable Food Technol. 2023. Vol. 1. P. 9.
2. Šimek M., Homola T. / Eur. Phys. J. D. 2021. Vol. 75. P. 210.
3. Panka D., Jeske M., Łukanowski A., Baturo-Ciesniewska A., Prus P., Maitah M., Maitah K., Malec K., Rymarz D., Muhire J.d.D. et al. / Agronomy. 2022. Vol. 12. P. 841.
4. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M. / Processes. 2020. Vol. 8. P. 1002.
5. Puač N., Gherardi M., Shiratani M. / Plasma Process. Polym. 2017. Vol. 15. P. e1700174.
6. Gao Y., Francis K., Zhang X. / Food Res. Int. 2022. Vol. 157. P. 111246.

7. Guo D., Liu H., Zhou L., Xie J., He C. / J. Sci. Food Agric. 2021. Vol. 101. P. 4891.
8. Brabu C., Kutasi K., Magureanu M., Puač N., Živković S. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53. P. 223001.
9. Jirešová J., Scholtz V., Julák J., Šerá B. / Plants. 2022. Vol. 11. P. 1471.
10. Kučerová K., Henselová M., Slovákova L., Hensel K. / Plasma Process. Polym. 2019. Vol. 16. P. e1800131.
11. Naumova I. K., Maksimov A. I., Khlyustova A. V. / Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2011. Vol. 47. P. 263.
12. Chen D., Chen P., Cheng Y., Peng P., Liu J., Ma Y. et al. / Food Bioproc. Tech. 2019. Vol. 12. P. 246.
13. Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. / Прикладная физика. 2020. № 6. С. 34.
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. Zhang S., Rousseau A., Dufour T. / RSC Advances. 2017. Vol. 7. P. 31244.
18. Наумова И. К., Субботкина И. Н., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40.
19. Takahata J., Takaki K., Satta N., Takahashi K., Fujio T., Sasaki Y. / Jap. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54. P. 01AG07
20. Park D. P., Davis K., Gilani S. M., Alonzo C.-A., Dobrynin D., Friedman G., Fridman A. A., Rabinovich A., Fridman G. / Current Appl. Phys. 2013. Vol. 13. P. 19.
21. Stasińska-Jakubas M., Hawrylak-Nowak B. / Molecules. 2022. Vol. 27. P. 2801.
22. Boamah P. O., Onumah J., Aduguba W. O., Santo K. G. / Int. J. Biol. Macromol. 2023. Vol. 235. P. 123858.
23. 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. P. 1035.
24. Vasilieva T., Goñi O., Quille P., O'Connell S., Kosyakov D., Shestakov S., Ul'yanovskii N., Vasiliev M. / Processes. 2021. Vol. 9. P. 103.
25. Chokradjaroen C., Niu J., Panomsuwan G., Saito N. / Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. P. 4308.
26. Khlyustova A., Sirotkin N., Naumova I., Tarasov A., Titov V. / Plasma Chem. Plasma Process. 2022. Vol. 42. P. 587.
27. Titov V. A., Lipatova I. M., Mezina E. A., Kuz'micheva L. A. / High Energy Chem. 2016. Vol. 50. P. 411.
28. Wang D., Song R., Liu Y., Ren J., Zhang Y., Wang T., Qu G. / J. Clean. Prod. 2021. Vol. 316. P. 128295.
29. Tantiplapol T., Singsawat Y., Narongsil N., Damrongsakkul S., Saito N., Prasertsung I. / Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2015. Vol. 32. P. 116.
30. Ma F., Li P., Zhang B., Zhao X., Fu Q., Wang Z., Gu C. / Int. J. Biol. Macromol. 2017. Vol. 98. P. 201.
31. Davoodbasha M., Lee S.-Y., Kim J.-W. / Int. J. Biol. Macromol. 2018. Vol. 118. P. 1511.
32. Chokradjaroen C., Theeramunkong S., Yui H., Saito N., Rujiravanit R. / Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 201. P. 20.
33. Titov V. A., Naumova I. K., Khlyustova A. V., Sirotkin N. A. / High Energy Chem. 2023. Vol. 57. Suppl. 1. P. S238.
34. Васько В. Т. Основы семеноведения полевых культур. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012.
35. Titov V. A., Khlyustova A. V., Naumova I. K., Sirotkin N. A., Agafonov A. V. / Plasma Phys. Rep. 2020. Vol. 46. P. 472.

PACS: 52.80. Wg, 82.33.Xj

Obtaining phytoactive products by gas-discharge treatment of an aqueous suspension of chitosan

I. K. Naumova¹, V. A. Titov², A. V. Khlyustova² and A. V. Agafonov²

¹ Ivanovo State University
39 Ermaka st., Ivanovo, 153025, Russia
E-mail: titov25@gmail.com

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

Received 25.08.2023; accepted 5.09.2023

The article presents the results of plasma-chemical treatment of an aqueous suspension of chitosan and shows the effect of the obtained products on the germination of pea seeds and on the early development of plants. The effect of a direct current discharge in air using a

suspension under treatment as a cathode, as well as a discharge in gas-vapor bubbles near the surface of an electrode immersed in a suspension (“underwater” discharge) is studied. The accumulation rates of water-soluble products and their energy yields were determined. It is shown that the use of modified suspensions increases the germination of seeds and the rate of initial development of plants when sown in the ground.

Keywords: plasma, underwater discharge, chitosan, modification, seed treatment, germination.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-84-90

REFERENCES

1. Rajan A., Boopathy B., Radhakrishnan M., Rao L., Schlüter O. K. and Tiwari B. K., *Sustainable Food Technol.* **1**, 9 (2023).
2. Šimek M. and Homola T., *Eur. Phys. J. D.* **75**, 210 (2021).
3. Panka D., Jeske M., Łukanowski A., Baturo-Ciesniewska A., Prus P., Maitah M., Maitah K., Malec K., Rymarz D., Muhire J.d.D. et al., *Agronomy* **12**, 841 (2022).
4. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K. and Shiratani M., *Processes* **8**, 1002 (2020).
5. Puač N., Gherardi M. and Shiratani M., *Plasma Process. Polym.* **15**, e1700174 (2017).
6. Gao Y., Francis K. and Zhang X., *Food Res. Int.* **157**, 111246 (2022).
7. Guo D., Liu H., Zhou L., Xie J. and He C., *J. Sci. Food Agric.* **101**, 4891 (2021).
8. Brabu C., Kutasi K., Magureanu M., Puač N. and Živković S., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 223001 (2020).
9. Jirešová J., Scholtz V., Julák J. and Šerá B., *Plants* **11**, 1471 (2022).
10. Kučerová K., Henselová M., Slováková Ľ. and Hensel K., *Plasma Process. Polym.* **16**, e1800131 (2019).
11. Naumova I. K., Maksimov A. I. and Khlyustova A. V., *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **47**, 263 (2011).
12. Chen D., Chen P., Cheng Y., Peng P., Liu J., Ma Y. et al., *Food Bioproc. Tech.* **12**, 246 (2019).
13. Naumova I. K., Titov V. A., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., *Applied Physics*, № 6, 34 (2020) [in Russian].
14. Zhou R., Li J., Zhou R., Zhang X. and Yang S., *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **53**, 36 (2019).
15. Lo Porto C., Ziuzina D., Los A., Boehm D., Palumbo F., Favia P., Tiwari B., Bourke P. and Cullen P. J., *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **49**, 13 (2018).
16. Naumova I. K., Maksimov A. I. and Khlyustova A. V., *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **47**, 263 (2011).
17. Zhang S., Rousseau A. and Dufour T., *RSC Advances* **7**, 31244 (2017).
18. Naumova I. K., Subbotkina I. N., Titov V. A., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., *Applied Physics*, № 4, 40 (2021) [in Russian].
19. Takahata J., Takaki K., Satta N., Takahashi K., Fujio T. and Sasaki Y., *Jap. J. Appl. Phys.* **54**, 01AG07 (2015).
20. Park D. P., Davis K., Gilani S. M., Alonzo C., Dobrynin D., Friedman G., Fridman A. A., Rabinovich A. and Fridman G., *Current Appl. Phys.* **13**, 19 (2013).
21. Stasińska-Jakubas M. and Hawrylak-Nowak B., *Molecules* **27**, 2801 (2022).
22. Boamah P. O., Onumah J., Aduguba W. O. and Santo K. G., *Int. J. Biol. Macromol.* **235**, 123858 (2023).
23. Vasilieva T. M., Naumova I. K., Galkina O. V., Udoratina E. V., Kuvshinova L. A., Vasiliev M. N., Khin Maung Htay, and Htet Ko Ko Zaw, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48**, 1035 (2020).
24. Vasilieva T., Goñi O., Quille P., O’Connell S., Kosyakov D., Shestakov S., Ul’yanovskii N. and Vasiliev M., *Processes* **9**, 103 (2021).
25. Chokradjaroen C., Niu J., Panomsuwan G. and Saito N., *Int. J. Mol. Sci.* **22**, 4308 (2021).
26. Khlyustova A., Sirotkin N., Naumova I., Tarasov A. and Titov V., *Plasma Chem. Plasma Process.* **42**, 587 (2022).
27. Titov V. A., Lipatova I. M., Mezina E. A. and Kuz’micheva L. A., *High Energy Chem.* **50**, 411 (2016).
28. Wang D., Song R., Liu Y., Ren J., Zhang Y., Wang T. and Qu G., *J. Clean. Prod.* **316**, 128295 (2021).
29. Tantiplapol T., Singawat Y., Naringsil N., Damrongsakkul S., Saito N. and Prasertsung I., *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **32**, 116 (2015).
30. Ma F., Li P., Zhang B., Zhao X., Fu Q., Wang Z. and Gu C., *Int. J. Biol. Macromol.* **98**, 201 (2017).
31. Davoodbasha M., Lee S-Y. and Kim J-W., *Int. J. Biol. Macromol.* **118**, 1511 (2018).
32. Chokradjaroen C., Theeramunkong S., Yui H., Saito N. and Rujiravanit R., *Carbohydrate Polymers* **201**, 20 (2018).
33. Titov V. A., Naumova I. K., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., *High Energy Chem.* **57**, S238 (2023).
34. Vasko V. T., *Fundamentals of field crops seed science*, S-Pb., Publishing house "Lan", 2012.
35. Titov V. A., Khlyustova A. V., Naumova I. K., Sirotkin N. A. and Agafonov A. V., *Plasma Phys. Rep.* **46**, 472 (2020).