

Изменение анатомической целостности мембран клеток растительного сырья под воздействием нитевидной микроплазмы при поддержке термоэлектронной эмиссии

И. А. Шорсткий, М. Д. Соснин

Исследовано воздействие низкотемпературной нитевидной микроплазмы на анатомическую целостность мембран клеток растительного сырья. Показано, что микроплазменная обработка позволяет формировать сквозные каналы в структуре растительных материалов и ускорять процесс массопереноса. Воздействие на мембрану клеток растительного сырья приводит к изменению капиллярно-пористой структуры с формированием дополнительных, образованных микроплазменным разрядом пор, ориентированных вдоль направления напряженности электрического поля. Установлено, что зависимость количества разрушенных клеток от интенсивности микроплазменной обработки имеет ограниченный характер и снижается при более длительной обработке растительного сырья. По результатам экспериментальных исследований установлено, что с помощью микроплазменной обработки существует возможность управлять массообменными процессами, важными для дальнейшей переработки растительного сырья, таких как сушка и экстрагирование.

Ключевые слова: микроплазменная обработка, электропорация, растительный материал, мембрана, капиллярно-пористая структура, вольт-амперная характеристика.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-235-244

Введение

Подготовка анатомической целостности клеточной структуры имеет особое значение для многих отраслей промышленности: электротерапия в медицине [1],

электропорация в пищевой и химической промышленности [2, 3], культивирование в растениеводстве [3], а также в процессах подготовки семян к прорастанию в сельском хозяйстве [4] и другие. Особого внимания заслуживает энергоёмкая и высокопроизводительная область пищевой и сельскохозяйственной промышленности, в которой объект переработки проходит через большое количество тепло- и массообменных процессов (нагрев, охлаждение, сушка, экстрагирование и пр.). Эффективность этих процессов напрямую зависит от степени подготовки анатомической целостности клеточной структуры раститель-

Шорсткий Иван Александрович, зав. лаб., к.т.н.

E-mail: i-shorstky@mail.ru

Соснин Максим Дмитриевич, аспирант.

Кубанский государственный технологический университет.

Россия, 350042, г. Краснодар, ул. Московская, 2.

Статья поступила в редакцию 09 марта 2021 г.

© Шорсткий И. А., Соснин М. Д., 2021

ного сырья. Так, к примеру, для подготовки клеточной структуры в промышленности проводят процессы влаготепловой подготовки (бланширование, жарка и пр.), процессы механической подготовки (плющение, сжатие). Однако представленные процессы являются устаревшими и требуют принципиально нового подхода к подготовке анатомической целостности растительных клеток.

Альтернативной технологией подготовки анатомической целостности клеточной структуры являются электрофизические методы воздействия, в частности, применение импульсных электрических полей [5] и неравновесной низкотемпературной плазмы [6]. Известно, что при работе с биологическими материалами необходимо учитывать фактор термического воздействия на пищевую систему, в том числе термолабильность пищевого сырья [7]. Такой подход требует контроля температурного уровня обработки, возникающего вследствие джоулева тепла. В связи с этим широкое распространение в этом направлении приобрела обработка импульсным электрическим полем и микроплазменная обработка [8, 9]. С точки зрения получаемого эффекта, указанные технологии отличаются характером воздействия. Так, например, в технологии воздействия импульсным электрическим полем обработка происходит по всему объему материала, а в случае с микроплазменной обработкой происходит фокусированный локальный эффект воздействия на анатомическую целостность клеточных структур.

Более того, в импульсном электрическом поле обработка происходит в объеме проводящей жидкости, а в случае микроплазменной обработки – в газовой среде. Благодаря этому последняя технология обладает перспективами использования в пищевой, химической и агропромышленной отрасли, где процесс обработки исходного сырья в объеме жидкости не всегда возможен.

С учетом требований к организации процесса воздействия на анатомическую целостность мембран растительных клеток и их термолабильность, наиболее подходящим способом генерации неравновесной низкотемпературной плазмы с малыми значениями тока является формирование таунсендовского разряда (ТР) [10]. Основным преимуществом ТР является наличие достаточной движущей силы процесса (напряженности поля) и малого по величине тока, что дает возможность проводить обработку пищевых продуктов без нагрева материала [11, 12]. Для реализации ТР применительно к биологическим материалам необходимо использование специальных мер стабилизации разряда, таких как оснащение катодной плоскости дополнительным источником электронов в виде термоэлектронной эмиссии [13].

Целью данной работы является развитие перспективного направления микроплазменной обработки растительного сырья с помощью нитевидной микроплазмы при поддержке термоэлектронной эмиссии применительно к изучению изменения анатомической целостности мембран растительных клеток.

Экспериментальная техника и методика

Обработка микроплазмой.

Обработку нитевидной микроплазмой (НМ) проводили с использованием высоковольтной установки на базе высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20 (Matsusada Precision Inc, Japan). Установка, представленная на рис. 1 обеспечивала формирование устойчивого микроплазменного разряда при поддержке термоэлектронной эмиссии (ТЭ). Параметры импульса на аноде следующие: длительность импульса 40 мкс, частота следования импульсов 100 Гц, амплитуда импульсного электрического поля 6 кВ/см. Общее количество импульсов при обработке 1 см² составляло от 250 до 1250 единиц за счет из-

менения скорости обработки. Измерение высоковольтного сигнала осуществляли с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 (Tektronix, США). Ячейка для обработки растительных материалов представляла

собой систему из плоского анода, на котором располагают исследуемый материал, и катода с ТЭ, установленного на шасси для осуществления сканирующего принципа обработки.

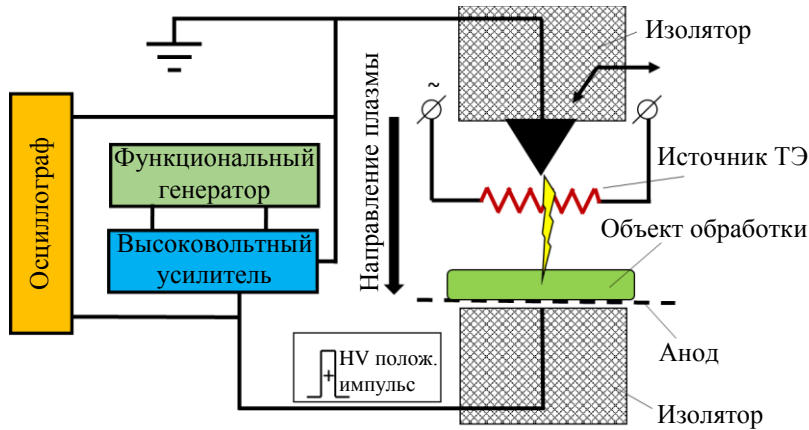


Рис. 1. Схема обработки нитевидной микроплазмой растительного материала.

Обработке подвергались два типа растительных материалов: тонкий листовый растительный материал (листья табака сорта Вирджиния 202 (ВНИИТИ, Краснодар)) и растительный материал (яблоки сорта Гренни Смит), нарезанный на диски толщиной 5 мм.

Структура материала.

Растительный материал после обработки нитевидной микроплазмой исследовали на предмет изменения анатомической целостности мембран растительных клеток с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 (Россия), совмещенного с цифровой камерой (HD 5MP USB Cmos Camera). Для оценки поверхностных изменений структуры материала использовали поверхностный микроскоп Микромед ПОЛАР 1 (Россия).

Индекс дезинтеграции.

В качестве количественного метода оценки эффективности воздействия обработки НМ на структуру растительного материала использовали величину индекса дезинтеграции [14, 15]. Сущность метода заключается в измерении величины электропроводности растительного материала до и после обработки [16]. Величину элект-

тропроводности определяли с использованием прецизионного LCR-метра 1920 Quadtech (IET LABS, NY, USA) на базовых узловых частотах: 10, 100 Гц, 1, 10, 100 кГц. При работе с листовыми растительными материалами использовали двухпиновую насадку, а при работе с растительными материалами толщиной 5 мм использовали ячейку из плоскопараллельных электродов с набором четырехпиновых коннекторов (1700–03 Kelvin Leads) [16].

Величину индекса дезинтеграции определяли по формуле:

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i},$$

где σ – электропроводность образца после обработки; σ_i – электропроводность образца до обработки (значение близко к нулю); σ_d – электропроводность максимально разрушенных клеток образцов (замороженных при -20°C).

Результаты и их обсуждение

Электрические характеристики разряда.

Фотография обработки нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии образца яблока пред-

ставлена на рис. 2, а. При нахождении растительного материала в зазоре между анодом и катодом разряд зажигается при напряженности электрического поля на уровне 6 кВ/см при поддержке термоэлектронной эмиссии [13]. Обработка растительного материала проводилась при движении катода с помощью шаговых двигателей для покрытия всей поверхности материала. Осциллограммы напряжения на электродах лабораторной установки и тока разряда в межэлектродном про-

странстве с листовым материалом и яблоком в воздухе при атмосферном давлении показаны на рис. 2, б и 2, в соответственно. Одновременно с ростом напряжения происходит рост тока разряда, который через 140 мкс достигает значения 10,5 мА в образе яркой нитевидной линии голубого свечения (рис. 2, а). Длительность электронного тока (очевидно, эта стадия соответствует генерации процессов вторичной ионизации) существенно зависит от прикладываемого напряжения.

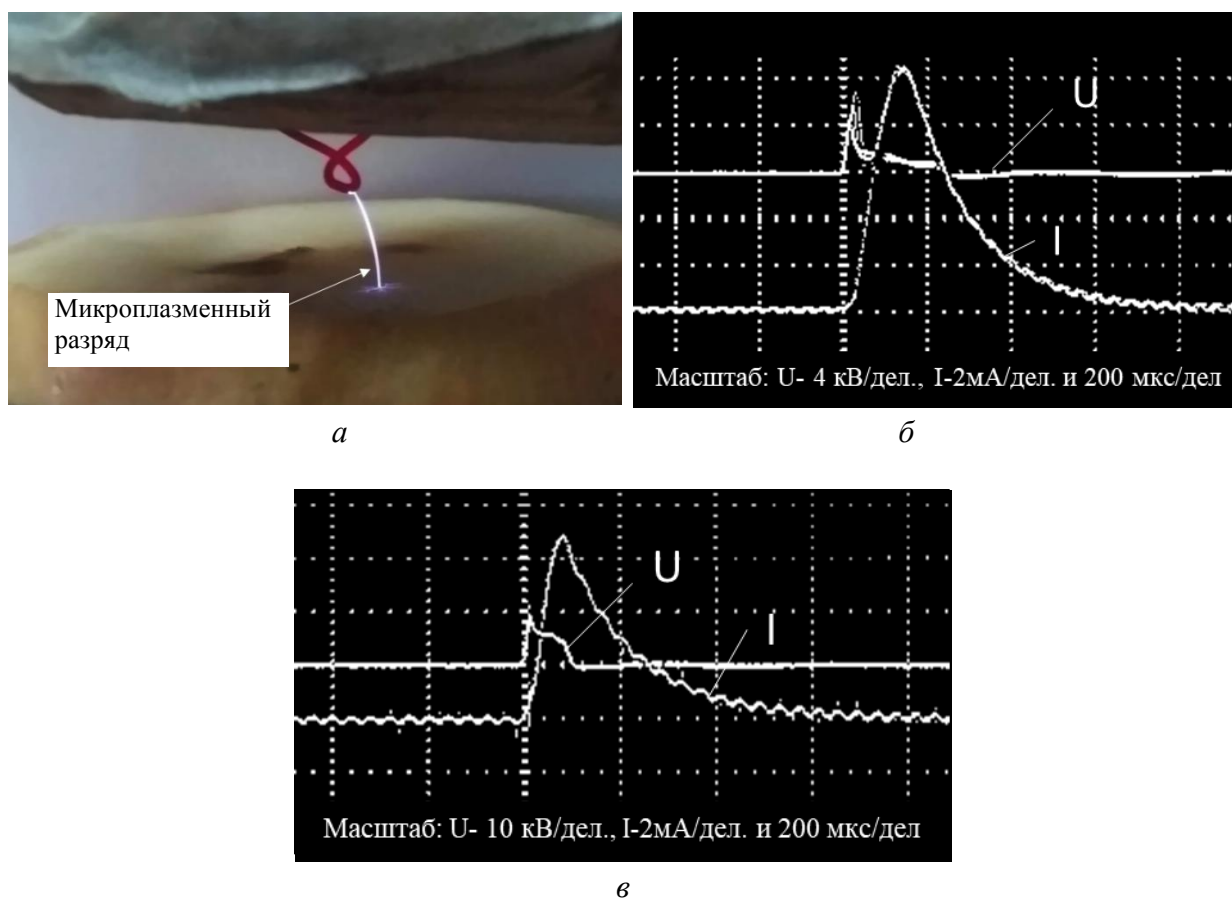


Рис. 2. Процесс обработки нитевидной микроплазмой яблока при напряженности электрического поля 6 кВ/см (а) и осциллограммы тока и напряжения TP для листового материала (б) и для яблока (в).

На рис. 3 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) для двух типов обрабатываемых материалов: листовой материал толщиной 0,05 мм и растительный материал – яблоко – толщиной 5 мм. Полученная ВАХ демонстрирует характерную зависимость для таунсендовского

разряда при малых значениях силы тока. При сравнении ВАХ для листового материала по сравнению с яблоком наблюдается снижение величины напряжения пробоя газовой среды межэлектродного пространства между анодом и катодом в лабораторной установке. Для листового

материала напряжение пробоя составляло 13 кВ, а для яблока – 15,5 кВ. Снижение величины напряженности пробоя связано с отличием толщин материалов и, как следствие, общего сопротивления в зазоре между анодом и катодом. Следует заметить, что величина тока разряда для протоколов

с растительным материалом меняется на уровне 1,6–2,2 мА по сравнению с величиной тока для протокола без растительного материала. Данный факт согласовывается с изменением величины напряженности пробоя для рассматриваемых протоколов.

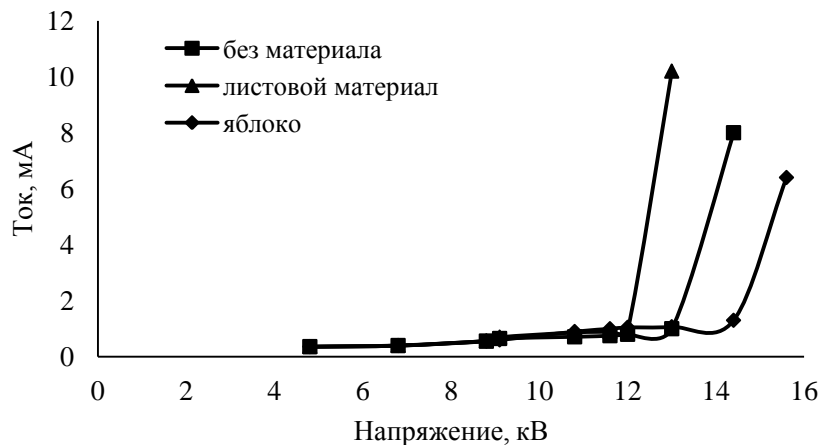


Рис. 3. Вольтамперная характеристика таунсендовского разряда при поддержке термоэлектронной эмиссии и при межэлектродном расстоянии 12 мм.

Влияние обработки нитевидной микроплазмы на анатомическую структуру материала.

На рис. 4 представлена оценка поверхности и внутренней структуры листьев табака после обработки нитевидной микроплазмой. Основным визуальным отличием поверхности листа является потемнение обработанной зоны. Данный эффект связан с активным проникновением кислорода во внутриклеточное пространство модифицированной структуры растительного материала и его взаимодействием с фенольными веществами, присутствующими в листьях. Аналогичный эффект был обнаружен при обработке импульсным электрическим полем в жидкости рядом авторов [17, 18]. Здесь потемнения обработанной растительной ткани были зафиксированы для листьев розмарина [17] и миндаля [18].

Снаружи ткань табачного листа покрыта слоем сравнительно однородных клеток эпидермиса (Э), расположенных в один ряд. Снаружи эпидермис покрыт

сплошной, но нерасчлененной на клетки пленкой – кутикулой, которая играет роль защитной ткани. Покровные ткани (эпидермис и кутикула) являются преградой для массообменных процессов при сушке. При обработке нитевидной микроплазмой на поверхности листа образуются отверстия, напоминающие устьичные отверстия, через которые осуществляется интенсивный массообмен (О). В зависимости от величины напряженности электрического поля, формируемые отверстия могут иметь обратимую и необратимую структуру, по аналогии с процессом электропорации [19, 20]. Благодаря интенсивному массопереносу микроплазменную обработку можно активно применять для интенсификации процессов сушки и экстрагирования. Термическое влияние в процессе обработки яблока толщиной 5 мм находилось в диапазоне роста температуры менее 1 °С. Отсутствие локального перегрева достигалось за счет постоянного движения катода.

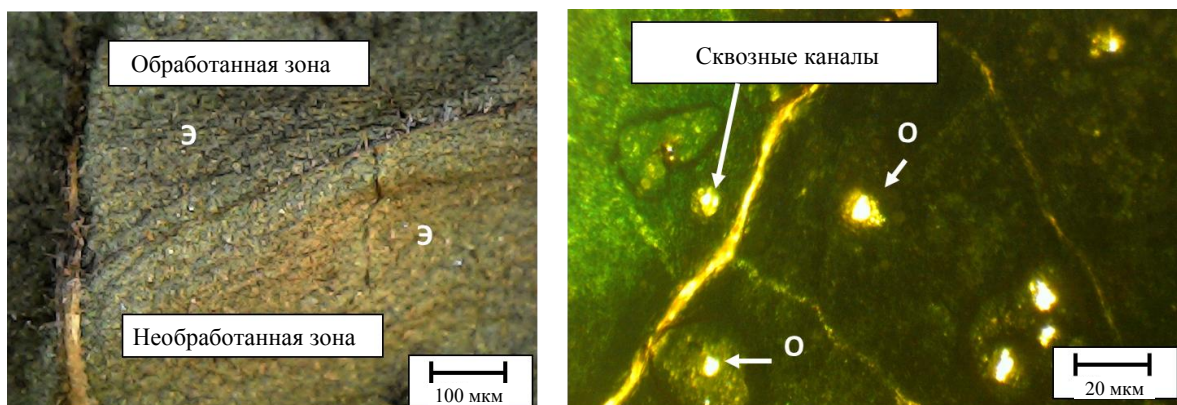


Рис. 4. Поверхность табачного листа: обработанная и необработанная нитевидной микроплазмой зона и фотографии с оптического микроскопа с наличием наружного эпидермиса (Э) и сквозных каналов (О).

На рис. 5 представлен процесс измерения электропроводности листового материала. Как отмечено ранее, обработанный материал подвергнут активному проникновению кислорода с последующей активацией окислительных процессов. Благодаря этому обработанный материал приобретает более темный окрас (см. рис. 4). График частотной зависимости электропроводности представляет собой типовую кривую для диэлектрического растительного материала [21]. В результа-

те микроплазменной обработки величина электропроводности материала увеличилась на всем частотном спектре, что говорит о возникновении более проводящей среды за счет выделения внутриклеточной жидкости в межклеточное пространство. Равномерность обработки достигалась за счет подобранного режима движения катода, установленного на шасси, среднего размера клетки растительного материала (100–300 мкм), а также частоты следования импульсов.

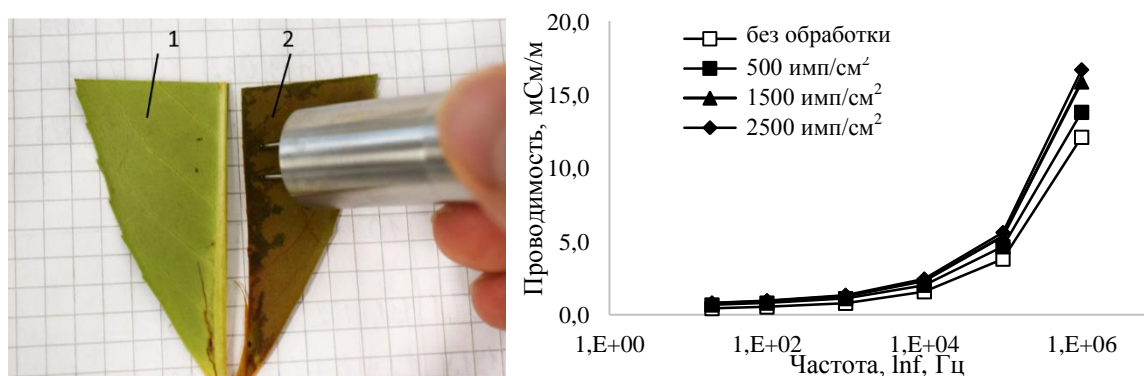


Рис. 5. Экспериментальные данные. Слева – процесс измерения величины электропроводности листового материала: 1 – необработанный; 2 – после микроплазменной обработки. Справа – зависимость электропроводности от частоты импульсов для обработанных и необработанных листовых материалов.

При микроплазменной обработке в структуре материала формируются сквозные проточные капилляры (рис. 6, а), проходящие вдоль всей толщины материала. Под действием внутриклеточного давления образованный микроплазменной обра-

боткой капилляр заполняется жидкой фазой (внутриклеточной жидкостью), и часть жидкости выделяется на поверхности материала в виде капли (рис. 6, б).

Таким образом, капиллярно-пористая система растительного материала может

состоять из нескольких параллельных, различного диаметра капилляров (в зависимости от интенсивности обработки), установленных перпендикулярно поверхности материала и проходящих вдоль всей длины капилляра без какого-либо сопротивления. Движение жидкости в капилляре является результатом совместных действий капиллярных и вязкостных сил, а движение паров в капилляре – присутствием диффузии в газовой фазе.

При оценке индекса дезинтеграции Z , используя выражение (1), выяснилось, что после микроплазменной обработки величина индекса резко возрастает с увеличением количества направленных импульсов (рис. 7). Рост величины индекса дезинтеграции связан с ростом количества формируемых сквозных каналов и количеством разрушенных мембран растительных клеток. Так, для табачного листа и яблока

максимальное значение индекса Z зафиксировано при 1500 имп/см². Стоит отметить, что после достижения определенного уровня индекса Z количество разрушенных клеток не увеличивается. Данный факт связан с точечным характером обработки, ограничивающим полное разрушение клеточной структуры. Однако необходимо подчеркнуть, что в случае использования объемной обработки импульсным электрическим полем рядом исследователей был установлен аналогичный факт. Авторы [22] связывают ограничения роста индекса дезинтеграции с возникновением обратного эффекта процесса электропорации вследствие сверхобработки. Схожая зависимость величины индекса дезинтеграции для материалов картофель и яблоко были получены другими авторами при обработке импульсным электрическим полем [23].

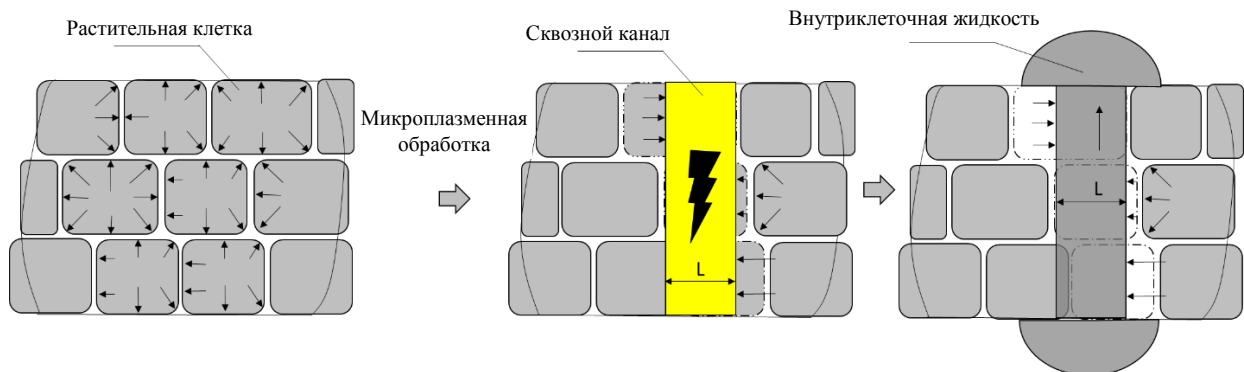


Рис. 6. Модель структуры растительного материала до и после микроплазменной обработки с иллюстрацией этапов пробоя биологической структуры и выделение капли жидкости на поверхности материала.

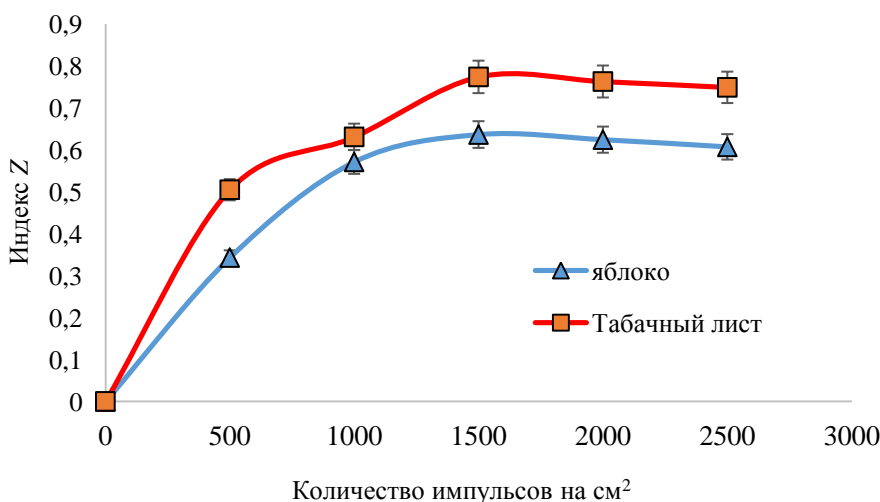


Рис. 7. Зависимость индекса дезинтеграции от плотности количества импульсов на 1 см².

Заключение

В работе изучено изменение анатомической целостности мембран растительных клеток для тонкого листового материала (листья табака) и растительного материала – яблоко – толщиной 5 мм под воздействием микроплазменной обработки, инициируемой несамостоятельным разрядом в воздухе атмосферного давления при поддержке термоэлектронной эмиссии. Воздействие микроплазменной обработки на структуру растительного материала приводит к образованию сквозных каналов с выделением на поверхности капель жидкости внутриклеточной жидкости. Наличие подобного рода сквозных каналов положительно влияет на массоперенос и, как следствие, на эффективность дальнейшей переработки растительных материалов.

Важно отметить, что при увеличении количества направляемых импульсов величина индекса дезинтеграции клеток увеличивается и достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение количества направляемых импульсов снижает величину индекса дезинтеграции за счет возникающего отрицательного эффекта обработки.

Результаты, полученные в данном исследовании, показывают, что микроплазменная обработка влияет на структуру обрабатываемого материала и формирует модифицированную структуру с наличием дополнительных сквозных каналов, способствующих более интенсивному массопереносу.

Таким образом, микроплазменная обработка представляет собой новый способ подготовки растительного материала для дальнейшей переработки растительного сырья, используемого в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных МК-2188.2021.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черныш А. М., Козлова Е. К., Мороз В. В., Борщаговская П. Ю., Близнюк У. А., Рысаева Р. М. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2009. Т. 148. № 9. С. 347.
2. Василяк Л. М. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 5.
3. Тихонов В. Н., Алешин С. Н., Иванов И. А., Тихонов А. В. // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы. 2018. № 5. С. 307.
4. Трушин П. М. Восстановление минеральных субстратов путем электрофизической обработки: дис. – Челябинский государственный агроинженерный университет, 2007.
5. Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В., Сордонова М. Н., Будажапов Л. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 260.
6. Saulis G. // Food Engineering Reviews. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 52.
7. Усов А. Ф., Потокин А. С., Ильин Д. В. // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5-13 (39). С. 7.
8. Снежкин Ю. Ф., Шапарь Р. А. // Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31. № 7. С. 110.
9. Golda J., Held J., Redeker B., Konkowski M., Beijer P., Sobota A., Schulz-Von Der Gathen V. // J. Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49. No. 8. P. 084003.
10. Shorstkii I. // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 66. P. 102540.
11. Наумов Н. Ю. // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 337.
12. Misra N. N., Schlüter O., Cullen P. J. Cold plasma in food and agriculture. – Academic Press, 2016.
13. Moghaddam T. N., Elhamirad A. H., Sa-eidi Asl. M. R., Shahidi Noghabi M. // Chemical Papers. 2020. Vol. 74. P. 3957.
14. Пат. 2727915 РФ. И. А. Шпорсткий, заявл. 22.11.2019; опубл. 24.07.2020.
15. Wang L., Boussetta N., Lebovka N., Vorobiev E. // Food and Bioproducts Processing. 2020. Vol. 122. P. 13.
16. Angersbach A., Heinz V., Knorr D. // Biotechnology Progress. 1999. Vol. 15. No. 4. P. 753.

17. Liu T., Liu M., Liu J., Mao X., Zhang S., Shao Y., Qian Y. // *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1121. P. 42.

18. Tzima K., Brunton N. P., Lyng J. G., Frontuto D., Rai D. K. // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021. Vol. 69. P. 102644.

19. Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке: монография. – Краснодар: ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

20. Rubinsky B. (ed.). *Irreversible electroporation*. – Springer Science & Business Media, 2009.

21. Nelson S. O., Bartley Jr P. G. // *Transactions of the ASAE*. 2000. Vol. 43. No. 6. P. 1733.

22. Ostermeier R., Giersemehl P., Siemer C., Töpfl S., Jäger H. // *J. Food Engineering*. 2018. Vol. 237. P. 110.

23. Arevalo P., Ngadi M. O., Bazhal M. I., Raghavan G. S. V. // *Drying Technology*. 2004. Vol. 22. No. 5. P. 1233.

PACS: 52.80.Dy, 52.80.-s

Cell membranes of plant materials anatomical integrity changes under the influence of filamentary microplasma treatment assisted by thermionic emission

I. A. Shorstkii and M. D. Sosnin

Kuban State Technological University
2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350042, Russia
E-mail: i-shorstky@mail.ru

Received March 09, 2021

The effect of low-temperature filamentary microplasma treatment on the anatomical integrity of cell membranes of plant raw materials was studied. It is shown that microplasma treatment forms a through channels in the structure of plant materials and accelerate mass transfer process. The effect on the cell membrane of plant raw materials leads to a change in the capillary-porous structure with the formation of additional pores formed by microplasma discharge, oriented along the direction of the electric field strength. It was found that the dependence of the number of destroyed cells on the intensity of microplasma treatment is limited and decreases with longer processing of plant raw materials. According to the results of experimental studies, it was established that with microplasma treatment assistant, it is possible to control mass transfer processes which are important for the further processing of plant raw materials, such as drying and extraction.

Keywords: microplasma treatment, electroporation, plant material, membrane, capillary-porous structure, current-voltage characteristic.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-235-244

REFERENCES

1. A. M. Chernysh, E. K. Kozlova, V. V. Moroz, P. Ju. Borshhagovskaja, U. A. Bliznjuk, and R. M. Ry-

saeva, *Bjulleten' jeksperimental'noj biologii i mediciny* **148**, 9 (2009).

2. L. M. Vasiljak, Usp. Prikl. Fiz. **6** (1), 5 (2018).
3. V. N. Tihonov, S. N. Aleshin, I. A. Ivanov, and A. V. Tihonov, Radiacionnye tehnologii v sel'skom hozjajstve i pishhevoj promyshlennosti: sostojanie i perspektivy, No. 5, 307 (2018).
4. P. M. Trushin, Vosstanovlenie mineral'nyh substratov putem jelektrofizicheskoj obrabotki: dis. – Cheljabinskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet, 2007.
5. B. B. Baldanov, C. V. Ranzhurov, M. N. Sordonova, and L. V. Budazhapov, Usp. Prikl. Fiz. **7** (3), 260 (2019).
6. G. Saulis, Food Engineering Reviews **2** (2), 52 (2010).
7. A. F. Usov, A. S. Potokin, and D. V. Il'in, Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN, No. 5-13 (39), 7 (2016).
8. Ju. F. Snezhkin and R. A. Shapar', Promyshlennaja teplotehnika **31** (7), 110 (2009).
9. J. Golda, J. Held, B. Redeker, M. Konkowski, P. Beijer, A. Sobota, and V. Schulz-Von Der Gathen, Journal of Physics D: Applied Physics **49** (8), 084003 (2016).
10. I. Shorstkii, Innovative Food Science & Emerging Technologies **66**, 102540 (2020).
11. N. Ju. Naumov, High Temp. Phys. **53** (3), 337 (2015).
12. N. N. Misra, O. Schlüter, and P. J. Cullen, *Cold plasma in food and agriculture* (Academic Press, 2016).
13. T. N. Moghaddam, A. H. Elhamirad, Asl. M. R. Saeidi, and M. Shahidi Noghabi, Chemical Papers **74**, 3957 (2020).
14. I. A. Shorstkij, Pat. 2727915 RF, 22.11.2019; pub. 24.07.2020.
15. L. Wang, N. Boussetta, N. Lebovka, and E. Vorobiev, Food and Bioproducts Processing **122**, 13 (2020).
16. A. Angersbach, V. Heinz, and D. Knorr, Biotechnology Progress **15** (4), 4753 (1999).
17. T. Liu, M. Liu, J. Liu, X. Mao, S. Zhang, Y. Shao, and Y. Qian, Analytica Chimica Acta **1121**, 42 (2020).
18. K. Tzima, N. P. Brunton, J. G. Lyng, D. Frontuto, and D. K. Rai, Innovative Food Science & Emerging Technologies **69**, 102644 (2021).
19. I. A. Shorstkij, *Application of pulsed electric field treatment of biomaterials in preparation for drying*. (Kuban State Technological University: Krasnodar, 2020) [in Russian].
20. B. Rubinsky (ed.), *Irreversible electroporation* (Springer Science & Business Media, 2009).
21. S. O. Nelson and Jr. P. G. Bartley, Transactions of the ASAE **43** (6), 1733 (2000).
22. R. Ostermeier, P. Giersemehl, C. Siemer, S. Töpfl, and H. Jäger, Journal of Food Engineering **237**, 110 (2018).
23. P. Arevalo, M. O. Ngadi, M. I. Bazhal, and G. S. V. Raghavan, Drying Technology **22** (5), 1233 (2004).