

Предобработка нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии в процессе сублимационной сушки плодов манго



М. Д. Соснин*^{ORCID}, И. А. Шорсткий^{ORCID}

Кубанский государственный технологический университет^{ORCID},
Краснодар, Россия

Дата поступления в редакцию: 02.11.2020

Дата принятия в печать: 25.12.2020

*e-mail: maksim-sosnin7@mail.ru



© М. Д. Соснин, И. А. Шорсткий, 2020

Аннотация.

Введение. Круглогодичная доступность экзотических фруктов обеспечивает население качественными продуктами питания. Сохранение высокого качества продукта и повышение эффективности его переработки возможно путем комбинирования сублимационной сушки с применением передовых электрофизических технологий. В качестве такой технологии в данной работе выступает предварительная обработка нитевидной микроплазмой (НМ) при поддержке термоэлектронной эмиссии, основанная на нетепловом методе обработки пищевого продукта. Целью работы является изучение влияния предварительной обработки нитевидной микроплазмой на эффективность сублимационной сушки плодов манго с оценкой качественных характеристик высушиваемого продукта.

Объекты и методы исследования. В работе изучены плоды манго. Перед сублимационной сушкой свежие плоды нарезали на ломтики толщиной $6,0 \pm 0,5$ мм. Средний диаметр анализируемого ломтика составлял 72 ± 3 мм. Высушенные с помощью сублимационной сушки плоды анализировали по степени регидратации и качественным характеристикам. Обработку нитевидной микроплазмой проводили при значениях напряженности электрического поля $E = 600$ кВ/м и величиной удельной энергии на единицу обработанного материала 1 кДж/кг.

Результаты и их обсуждение. Предварительная обработки нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии позволила сократить длительность процесса сушки на 38 % для достижения равновесного влагосодержания и увеличить степень регидратации с 2,58 до 3,14. Анализ качественных характеристик показал, что предварительная обработка НМ увеличивает общее содержание фенолов и каротиноидов, но снижает общее содержание флавоноидов. Предварительная обработка НМ также влияет на антиоксидантную способность, снижая ее с 0,43 до 0,41 по методу ABTS и с 0,90 до 0,75 по методу DPPH.

Выводы. Несмотря на незначительные снижения некоторых качественных характеристик высушенных плодов манго, положительный эффект от обработки нитевидной микроплазмой представляет потенциальный интерес для применения в промышленном масштабе.

Ключевые слова. Микроплазма, электропорация, сушка, обработка пищевых продуктов, импульсное электрическое поле, плоды

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке совместного гранта Немецкой службы академических обменов (DAAD)^{ORCID} и программы «Михаил Ломоносов» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнаука)^{ORCID} (№ 15.13385.2019/13.2).

Для цитирования: Соснин, М. Д. Предобработка нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии в процессе сублимационной сушки плодов манго / М. Д. Соснин, И. А. Шорсткий // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 4. – С. 681–689. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-681-689>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Microplasma Pretreatment of Mango Fruits During Freeze Drying with Thermoelectric Emission

Maxim D. Sosnin*^{ORCID}, Ivan A. Shorstkii^{ORCID}

Received: November 02, 2020

Accepted: December 25, 2020

Kuban State Technological University^{ORCID}, Krasnodar, Russia

*e-mail: maksim-sosnin7@mail.ru



© M.D. Sosnin, I.A. Shorstkii, 2020

Abstract.

Introduction. The research objective was to study the effect of filamentous microplasma pretreatment on the efficiency of freeze drying. It featured mango fruit and assessed the quality of the dried product. Year-round availability of exotic fruit poses a challenge of providing consumers with high-quality food products. Freeze-drying, if combined with advanced electrophysical technologies, makes it possible to maintain the high quality of the product while improving the processing. This non-thermal method technology presupposes pretreatment with filamentous microplasma (FM) and thermoelectric emission. FM affects the membrane of plant cells and forms a through channel, thus improving mass transfer.

Study objects and methods. Before freeze-drying, fresh mango fruit was cut into slices of 6.0 ± 0.5 mm each and the average diameter of 72 ± 3 mm. Freeze-dried fruits were analyzed according to the degree of rehydration and quality. FM treatment was performed at the electric field strength $E = 600$ kV/m, while the specific energy was 1 kJ/kg per unit.

Results and discussion. FM pretreatment with thermoelectric emission reduced the drying time by 38%, which was enough to achieve equilibrium moisture content. It also increased the degree of rehydration from 2.58 to 3.14. FM pretreatment raised the total content of phenols and carotenoids, but reduced the total content of flavonoids. FM pretreatment also affected the antioxidant capacity, reducing it from 0.43 to 0.41 by the ABTS method and from 0.90 to 0.75 by the DPPH method.

Conclusion. FM pretreatment increased the ability to restore the freeze-dried samples. The mango samples preserved the high content of phenols and carotenoids. The antioxidant capacity of the FM-treated samples proved to be slightly lower than in the control samples. In general, pretreatment with filamentous microplasma and thermoelectric emission had a positive effect on the quality of freeze-dried mango, reduced the processing time, and improved the rehydration characteristics of the final product.

Keywords. Microplasma, electroporation, drying, food handling, pulsed electric field, fruit

Funding. The authors gratefully acknowledge German Academic Exchange Service (DAAD)^{ROR} and Mikhail Lomonosov joint scholarship program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka)^{ROR} (No 15.13385.2019/13.2).

For citation: Sosnin MD, Shorstkii IA. Microplasma Pretreatment of Mango Fruits During Freeze Drying with Thermoelectric Emission. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):681–689. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-681-689>.

Введение

Манго занимает особое место среди экзотических фруктов благодаря своей высокой пищевой ценности и растущему потребительскому спросу. По данным на 2017 год, производство манго в мировом масштабе составило порядка 50,5 млн. тонн продукции в год [1]. В плодах манго содержится большое количество сахаров, углеводов, а также витаминов А и С. Особую ценность в плодах манго представляют полифенолы, в том числе мангиферины, катехины, антоцианы и другие компоненты, которые полезны для человека [2].

Из-за сезонной популярности и малого срока хранения плодов манго процесс сушки является наиболее востребованным способом сохранения полезных микроэлементов для обеспечения потребителей плодами манго круглый год [2]. Снижение влагосодержания плодов манго можно проводить с помощью конвективной, вакуумной или сублимационной сушки, каждая из которых по-своему влияет на качество конечного продукта. Известно, что сушка горячим воздухом при высоких температурах негативно влияет на качество конечного продукта, вызывая потемнения и потерю витаминов [3]. Вакуумный процесс сушки применяется для термолабильных и легко окисляемых продуктов. Сублимационная сушка позволяет сохранить первоначальную структуру, цвет, вкус и высокую питательную ценность продукта. Однако у сублимационной сушки имеется ряд недостатков. Они связаны с высокими энергетическими затратами самого процесса из-за его длительности,

необходимостью проведения дополнительной стадии замораживания и низкой внутренней теплопередачей [4, 5].

В последнее время среди ученых и исследователей институтов в области пищевых технологий растет интерес к новым технологиям, таким как обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) и обработка нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии [6, 7]. Данные технологии позволяют поддерживать высокий уровень качества конечного продукта, аналогичный уровню исходного сырья [8]. Технология подготовки с помощью нитевидной микроплазмы (НМ) базируется на электрофизическом методе воздействия на анатомическую целостность растительных клеток. При обработке НМ на мембране растительных клеток формируются сквозные нано- и микроразмерные каналы, способствующие улучшенному массопереносу.

Влияние предварительной обработки ИЭП изучено для процесса вакуумной сублимационной сушки яблочной ткани [9]. Отмечено, что предварительная обработка ИЭП может сохранить форму и предотвратить усадку продукта. А. Lamterskitten с соавторами исследовал влияние ИЭП на общее содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность яблочной ткани [10]. Авторы наблюдали увеличение общего содержания фенолов до 47 % для обработанных ИЭП тканей по сравнению с необработанными. Аналогичные результаты были получены Y. Wu и D. Zhang при изучении процесса сублимационной сушки

картофеля с предварительной обработкой ИЭП [11]. Таким образом, современные электрофизические технологии способны значительно ускорять технологические процессы без потери качества продукции.

Экспериментальных данных по изучению нитевидной микроплазмы в литературе представлено в меньшем объеме, т. к. основное применение данной технологии ранее рассматривалось лишь для медицинских целей [12, 13].

Целью данной работы является изучение влияния предварительной обработки нитевидной микроплазмой на эффективность сублимационной сушки плодов манго с оценкой качественных характеристик высушиваемого продукта.

Объекты и методы исследования

Плоды манго сорта “Каен Оап” были приобретены в местном супермаркете (г. Краснодар, Россия). Плоды вытянутой зауженной формы с оранжевой кожурой хранили при температуре 4 °С в темном месте до проведения экспериментов. Начальная влажность плодов составляла 83 ± 1 %. Ее измеряли с помощью анализатора влажности (НС103, Mettler Toledo). Непосредственно перед сублимационной сушкой плоды манго нарезали на ломтики толщиной $6,0 \pm 0,5$ мм. Средний диаметр анализируемого ломтика составлял 72 ± 3 мм.

Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП). Обработку нитевидным микроплазменным разрядом проводили с использованием высоковольтной установки на базе высоковольтного усилителя «Matsusada 20-B-20» («Matsusada Precision Inc», Япония) (рис. 1).

Установка обеспечивает формирование устойчивого микроплазменного разряда с помощью источника термоэлектронной эмиссии (ТЭ). Параметры импульса: длительность импульса 40 мс, частота следования импульсов 100 Гц, амплитуда импульсов 600 кВ/м. Измерение высоковольтного сигнала осуществляли с помощью осциллографа «Tektronix TDS 220» через высоковольтный делитель (X1000, «Tektronix»). Ячейка для обработки плодов представляет собой систему из плоского анода, на котором располагают исследуемый материал, и катода с ТЭ, установленного на шасси для осуществления сканирующего принципа обработки. Эксперименты проводились с применением величины удельной энергии 1 кДж/кг и напряженности поля 600 кВ/м. Данные характеристики обработки были взяты на основе предыдущих данных [5]. Величину удельной энергии (Дж/кг) и напряженность электрического поля E (В/м) рассчитывали в соответствии со следующими уравнениями:

$$W_{уд} = \frac{U^2 C n}{2m} \quad (1)$$

$$E = \frac{U}{d} \quad (2)$$

где n – количество импульсов; m – масса

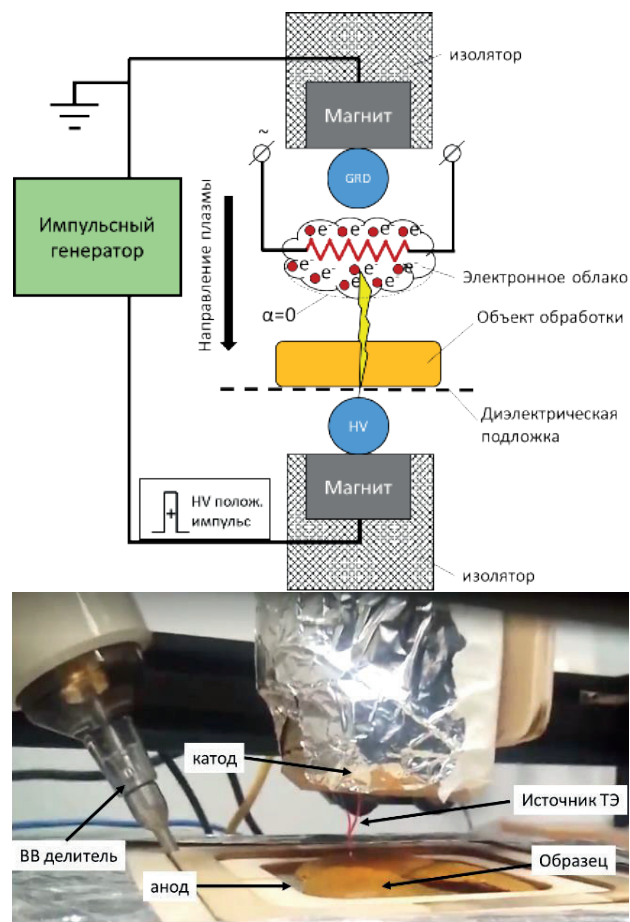


Рисунок 1. Схема установки для генерации нитевидной микроплазмы и визуализация процесса обработки

Figure 1. Generator of filamentary microplasma and its processing scheme

образцов (кг); U – напряжение (В); d – расстояние между электродами (м); C – емкость конденсаторов (1 нФ для используемой установки).

Сублимационная сушка. Сублимационную сушку плодов манго проводили в лабораторной сушилке «Gamma 1-16 LSC» («Martin Christ», Германия). Образцы перед сублимационной сушкой не замораживались, поэтому начальная температура составляла 22 ± 1 °С. Процесс сушки осуществлялся при следующих параметрах: температура пластины 40 °С, давление в камере 1 мбар. Нагрузка на сито составляла $2,86 \pm 0,09$ кг/м². Температура конденсатора составляла –55 °С.

Сбор данных изменения массы образцов осуществляли с помощью лабораторных весов, размещенных внутри сушильной камеры. Процесс сушки завершался, когда материал достигал постоянной массы. Кинетику сушки описывали через зависимость коэффициента влагосодержания и времени процесса. Содержание влаги на 1 кг сухого вещества влагосодержания определяли с помощью

уравнения (3):

$$K_{\text{вл}} = \frac{u_{\tau}}{u_0} \quad (3)$$

где u_{τ} – начальное влагосодержание (кг влаги/кг сухого вещества); u_0 – влагосодержание в момент сушки τ (кг влаги/кг сухого вещества).

Скорость сушки определяли как первую производную зависимости влагосодержания от времени. Время сушки рассчитывали как время, необходимое для получения образцами $K_{\text{вл}} = 0,004$ (содержание влаги $u = 2\%$ на сухой остаток).

Регидратация. Регидратацию проводили при температуре 20 °С. Кинетику процесса анализировали в интервале одного часа. Высушенный материал погружали в дистиллированную воду на 5, 15, 30 и 60 мин. Через обозначенный промежуток времени образцы вынимали из воды с помощью сита, удаляли лишнюю влагу с помощью бумажных полотенец и взвешивали. Величину регидратации определяли по формуле (4):

$$K_{\text{рег}} = \frac{u_t}{u_0} \quad (4)$$

где u_t – влагосодержание регидратированного манго в момент времени t (кг влаги/кг сухого вещества), u_0 – влагосодержание исходного образца (кг влаги/кг сухого вещества).

Подготовка экстракта манго. Для анализа содержания биологически активных соединений в плодах манго получали экстракт с помощью водного раствора этанола (80 %). Для этого 20 мл этанола смешивали с 2 г высушенного материала. Полученную массу гомогенизировали и нагревали до кипения с добавлением этанола в общем содержании 50 мл. Полученный экстракт фильтровали и использовали для определения общего содержания фенолов, общего содержания флавоноидов и антиоксидантной способности.

Содержание фенолов. Общее содержание фенолов (ОСФ) определяли с помощью фотометрического метода Фолина-Чокальтеу в соответствии с рабо-

той [14]. ОСФ определяли при длине волны 750 нм по отношению к чистому образцу (без экстракта) с помощью спектрофотометра и выражали в мг эквивалентов хлорогеновой кислоты (САЕ) на 100 г сухого вещества (мг САЕ/100 г сухого вещества).

Содержание флавоноидов. Общее содержание флавоноидов определяли спектрометрическим методом, основанным на реакции флавоноидных соединений с хлоридом алюминия. В стеклянную пробирку добавляли 2 мл экстракта манго и 2 мл 2 %-ного раствора хлорида алюминия (80 % раствор этанола). После перемешивания образцы хранили в темном месте в течение 10 мин [15]. С помощью спектрофотометра («Thermo Spectronic Helios Gamma», «Thermo Fischer Scientific», США) измеряли величину поглощения на длине волны 430 нм. Результаты выражали в мг эквивалента кверцетина (QE) на 1 г сухого вещества (мг QE/г сухого вещества).

Содержание каротиноидов. Общее содержание каротиноидов (ОСК) определяли спектрофотометрическим методом с применением растворов Карреза I и II [16]. Экстракцию осадка проводили с использованием ацетона и петролейного эфира и измеряли поглощение на длине волны 450 нм. Величину ОСК выражали в мг/100 г сухого вещества.

Антиоксидантная активность. Антиоксидантную способность оценивали с использованием свободных радикалов ABTS и DPPH. Методы исследования описаны в работе [15]. Антиоксидантную способность выражали в EC_{50} , которая представляет собой концентрацию экстракта, необходимую для уменьшения половины свободных радикалов (мг сухого вещества/мл).

Статистический анализ. Все эксперименты и измерения проводились с тройной повторностью. Для статистической оценки данных применяли метод ANOVA при $\alpha = 0,05$ в программной среде Statistica.

Результаты и их обсуждение

Сублимационная сушка. На рисунке 2 представлены экспериментальные кривые сублима-

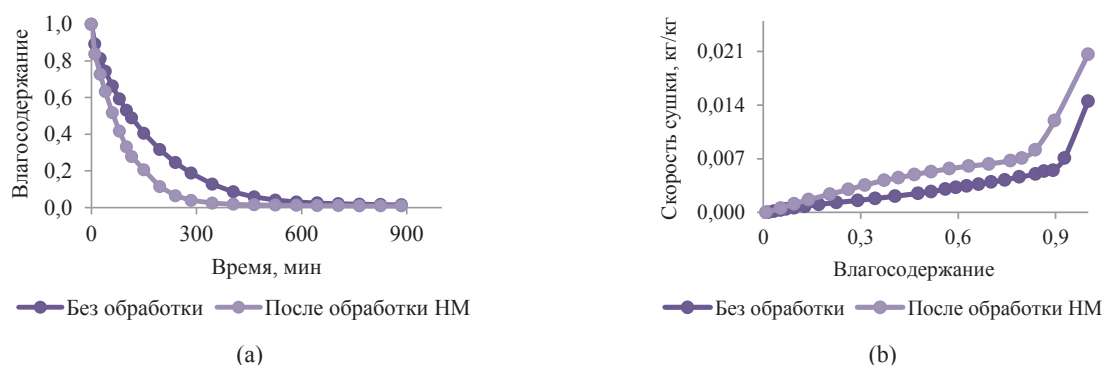


Рисунок 2. Кривая сушки (а) и кривая скорости сушки (б) обработанных нитевидной микроплазмой образцов манго в сублимационной сушилке

Figure 2. Drying curve (a) and drying rate curve (b) of freeze-dried mango samples treated with filamentous microplasma

ционной сушки нарезанных ломтиков плода манго. Полученные кривые сушки хорошо согласуются с работами авторов [2, 17]. Сушка предварительно обработанных нитевидной микроплазмой образцов манго проходила в две стадии:

1) переходная ранняя стадия, в течение которой удаляется свободная поверхностная влага;

2) период падающей скорости сушки, в течение которого удаляется физически и физико-химически связанная влага.

Предварительная обработка нитевидной микроплазмой демонстрирует значительное ускорение процесса сушки (рис. 2). Применение предварительной обработки НМ с удельным расходом энергии 1 кДж/кг снизило длительность процесса сушки на 35 %, которая необходима для достижения равновесного содержания влаги ($K_{\text{вл}} = 0,004$).

Электропорированная клеточная структура увеличивает массоперенос от внутренней структуры материала к поверхности [18]. Скорость сушки манго в начале периода падающей скорости сушки увеличилась с 0,005 (кг воды/кг сухого вещества)/мин до 0,0081 (кг воды/кг сухого вещества)/мин для образцов, предварительно обработанных НМ. Равновесное содержание влаги исследуемых образцов было достигнуто на 1320 и 825 минутах при предварительной обработке НМ при удельном расходе энергии 1 кДж/кг. При содержании влаги в плодах манго $K_{\text{вл}} < 0,1$ скорость сушки значительно снизилась. Это может быть вызвано длительностью процесса сушки, а также наличием химически связанной влаги в продукте.

Из анализа кинетики сублимационной сушки можно сделать вывод, что предварительная обработка НМ облегчает процесс сушки, ускоряя его за счет сформированных от воздействия НМ дополнительных каналов (пор) в структуре материала [19].

Регидратация образцов манго. Коэффициент регидратации считается одним из важнейших показателей качества высушенных продуктов. Степень восстановления при регидратации зависит от условий сушки, конечного содержания влаги и параметров предварительной обработки НМ. Графики изменения коэффициента регидратации ломтиков манго, высушенных с помощью сублимационной сушки без предварительной обработки НМ и после обработки НМ, приведены на рисунке 3. Коэффициент регидратации ломтиков манго изменялся от 82 до 97 % по отношению к массе образца до начала процесса. Из рисунка 3 видно, что использование обработки НМ ломтиков манго перед сушкой значительно повлияло на коэффициент регидратации. Предварительно обработанные НМ образцы манго перед сублимационной сушкой полностью восстанавливают исходную влажность и начальные физические свойства. Коэффициент регидратации для обработанных НМ образцов перед сублимационной сушкой через 1 ч составил 3,14 в

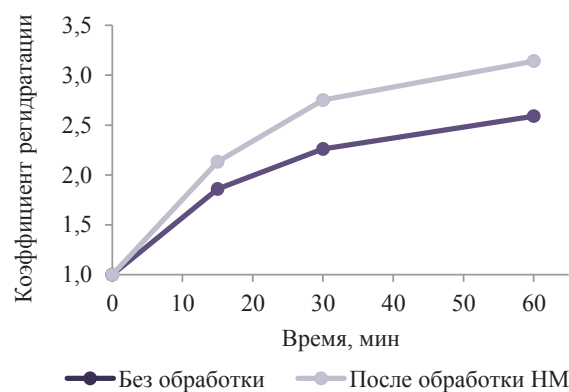


Рисунок 3. Зависимость коэффициента регидратации от времени при сублимационной сушке для образцов манго без и после предварительной обработки нитевидной микроплазмой

Figure 3. Effect of freeze drying time on the rehydration coefficient for mango samples with and without filamentous microplasma pretreatment

отличие от необработанных – 2,58.

Быстрое поглощение влаги связано с поверхностным и капиллярным всасыванием [20]. Улучшение восстановительной способности предварительно обработанных НМ образцов при сублимационной сушке обусловлено отсутствием объемной усадки. Это приводит к увеличению имеющегося межклеточного пространства, которое заполнено водой.

Качество образцов манго. Влага, испаряясь из материала в процессе сушки, уносит с собой летучие компоненты. Высушенные продукты теряют свой вкус и аромат. Состав летучих компонентов, выходящих с влагой, зависит от изменения температуры продукта в процессе сушки, а также от давления пара при данной температуре. Большое значение имеет растворимость в воде летучих компонентов высушиваемого материала. Некоторыми авторами сообщалось, что предварительная обработка импульсным электрическим полем может повысить эффективность извлечения ценных компонентов вместе с летучими компонентами продуктов [21].

Результаты исследования качественных характеристик высушенных плодов манго представлены в таблице 1. Данные показали, что общее содержание фенолов в свежих и высушенных образцах с применением предварительной обработки НМ изменялось в пределах от 206,0 до 297,6 мг САЕ/100 г сухого вещества.

Предварительная обработка НМ значительно повлияла на содержание фенолов: от 206,0 мг САЕ/100 г сухого вещества до 220,9 мг САЕ/100 г сухого вещества в образцах после сублимационной сушки с обработкой НМ при удельном расходе энергии 1 кДж/кг. Наибольшее содержание фенолов наблюдалось именно в этих образцах из-за отсутствия влияния высоких температур при сублимационной сушке с дополнительным эффектом

Таблица 1. Влияние обработки нитевидной микроплазмой на общее содержание фенолов, флавоноидов, каротиноидов и антиоксидантную способность образцов манго

Table 1. Effect of filamentous microplasma treatment on the total content of phenols, flavonoids, carotenoids, and antioxidant capacity of mango samples

Образец	Содержание фенолов, мг САЕ/100 г сухого вещества	Содержание флавоноидов, мг QE/г сухого вещества	Содержание каротиноидов, мг/100 г сухого вещества	Антиоксидантная активность (ABTS)	Антиоксидантная активность (DPPH)
Сублимационная сушка без обработки	206,0 ± 0,8	1,41 ± 0,23	114,9 ± 1,1	0,43 ± 0,00	0,90 ± 0,00
Сублимационная сушка с обработкой НМ 1 кДж/кг	220,9 ± 8,2	1,03 ± 0,01	172,4 ± 2,2	0,41 ± 0,00	0,75 ± 0,02
Свежее манго	297,6 ± 14,7	0,76 ± 0,09	487,1 ± 2,0	0,68 ± 0,03	1,18 ± 0,08

предварительной обработки НМ. Предварительная обработка НМ воздействует на структуру клеточной мембраны, способствуя улучшенному массообмену и высокой степени извлечения фенольных соединений. Результаты из таблицы 1 показали высокое содержание фенолов, которое отличается от данных, представленных в работах некоторых исследователей [17, 22]. Эти отличия можно объяснить различиями в степени зрелости исходных плодов манго.

Общее содержание флавоноидов. Флавоноиды являются важными биологически активными компонентами, которые обладают способностью уменьшать образование свободных радикалов и поглощать свободные радикалы. Предварительная обработка НМ для образцов, высушенных в сублимационной сушилке, повлияла на общее содержание флавоноидов, снизив с 1,41 до 1,03 мг QE/г сухого вещества. По сравнению со свежими образцами манго общее содержание флавоноидов в высушенных образцах увеличилось.

Общее содержание каротиноидов. Для образцов манго, высушенных в сублимационной сушилке с предварительной обработкой НМ и удельной энергии 1 кДж/кг, было установлено положительное влияние на содержание общего количества каротиноидов. Общее содержание каротиноидов увеличилось на 57,5 мг/100 г сухого вещества (50,0 %) при сублимационной сушке. Стоит отметить, что, в сравнении с другими методами сушки (конвективная и вакуумная), только сублимационная сушка может предотвратить окислительные потери каротиноидов. Результат эксперимента показал, что стадия предварительной обработки НМ важна для получения высокого выхода каротиноидов.

Антиоксидантные свойства, методы анализа ABTS и DPPH. Антиоксидантная способность свежего плода манго снизилась после сушки без обработки и после предварительной обработки НМ. Самая низкая антиоксидантная способность была обнаружена в образце без обработки НМ. Значения антиоксидантной активности при анализе DPPH изменялись с 0,74 до 1,18 ммоль QE/г сухого вещества в высушенных образцах манго. Значение DPPH снизилось на 0,15 ммоль QE/г сухого вещества

(17,7 %) после предварительной обработки НМ.

Таким образом, предварительная обработка НМ оказывает негативное влияние на антиоксидантные свойства плодов манго после сушки. Такое снижение может быть вызвано наличием активного ионизирующего фона при обработке нитевидной микроплазмой.

Выводы

Предварительная обработка нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии оказывает значительное влияние на кинетику сублимационной сушки, общее содержание фенолов, флавоноидов, каротиноидов и антиоксидантную способность образцов манго. Предварительная обработка НМ снизила длительность сублимационной сушки на 495 мин (38 %) и повлияла на коэффициент регидратации, увеличив его с 2,58 до 3,14.

Экспериментально установлено, что предварительная обработка НМ увеличивает способность к физическому восстановлению образцов, высушенных в сублимационной сушилке. Предварительная обработка НМ позволила сохранить высокое содержание фенолов и каротиноидов в образцах манго. Однако общее содержание флавоноидов для высушенных образцов манго снизилось после обработки НМ. Значение антиоксидантной способности высушенных образцов манго было снижено для образцов с предварительной обработкой НМ. Исходя из общей картины полученных результатов, можно сделать вывод, что предварительная обработка нитевидной микроплазмой при поддержке термоэлектронной эмиссии положительно влияет на качество плодов манго после сублимационной сушки, снижает длительность процесса и улучшает регидратационные характеристики продукта.

Критерии авторства

М. Д. Соснин занимался проведением лабораторных экспериментов, расчетом основных показателей качества плодов манго. И. А. Шорсткий руководил проектом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Oleksii Parniakov из Elea GmbH за сотрудничество и предоставление некоторых экспериментальных данных.

Contribution

M.D. Sosnin performed laboratory experiments and

calculated the main quality indicators. I.A. Shorstkii supervised the project.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgements

The authors are grateful to Oleksii Parniakov from Elea GmbH for cooperation and experimental data.

Список литературы

1. Mango production worldwide from 2000 to 2016 (in million metric tons) [Internet]. – Available from: <https://www.statista.com/statistics/577951/world-mango-production>. – Date of application: 02.10.2020.
2. Izli, N. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango / N. Izli, G. Izli, O. Taskin // *Food Science and Technology*. – 2017. – Vol. 37, № 4. – P. 604–612. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.28316>.
3. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango / R. A. B. de Medeiros, Z. M. P. Barros, C. B. O. de Carvalho [et al.] // *LWT – Food Science and Technology*. – 2016. – Vol. 67. – P. 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.049>.
4. Мякинникова, Е. И. Использование электрофизических и газожидкостных технологий для сушки плодового сырья / Е. И. Мякинникова, Г. И. Касьянов // *Техника и технология пищевых производств*. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 48–53.
5. Aghbashlo, M. Computer vision technology for real-time food quality assurance during drying process / M. Aghbashlo, S. Hosseinpour, M. Ghasemi-Varnamkhasi // *Trends in Food Science and Technology*. – 2014. – Vol. 39, № 1. – P. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.003>.
6. Solvent-free extraction of food and natural products / F. Chemat, A. S. Fabiano-Tixier, M. A. Vian [et al.] // *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*. – 2015. – Vol. 71. – P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.02.021>.
7. Shorstkii, I. Drying technology assisted by nonthermal pulsed filamentary microplasma treatment: Theory and practice / I. Shorstkii, E. Koshevoi // *ChemEngineering*. – 2019. – Vol. 3, № 4. – P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3040091>.
8. Шорсткий, И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке / И. А. Шорсткий. – Краснодар : Издательский Дом-Юг, 2020. – 172 с.
9. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue / O. Parniakov, O. Bals, N. Lebovka [et al.] // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2016. – Vol. 35. – P. 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>.
10. The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples / A. Lammerskitten, A. Wiktor, C. Siemer [et al.] // *Journal of Food Engineering*. – 2019. – Vol. 252. – P. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>.
11. Wu, Y. Effect of pulsed electric field on freeze-drying of potato tissue / Y. Wu, D. Zhang // *International Journal of Food Engineering*. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 857–862. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0149>.
12. Biological decontamination using pulsed filamentary microplasma jet / R. Pothiraja, J.-W. Lackmann, G. Keil [et al.] // *NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. – 2012. – P. 45–55. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2852-3_4.
13. Schoenbach, K. H. 20 years of microplasma research: a status report / K. H. Schoenbach, K. Becker // *The European Physical Journal D*. – 2016. – Vol. 70, № 2. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2015-60618-1>.
14. The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks / M. Nowacka, A. Wiktor, A. Anuszezwska [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – Vol. 56. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>.
15. Effect of ultrasound treatment during osmotic dehydration on bioactive compounds of cranberries / M. Nowacka, A. Fijalkowska, M. Dadan [et al.] // *Ultrasonics*. – 2018. – Vol. 83. – P. 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.06.022>.
16. The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue / A. Wiktor, M. Sledz, M. Nowacka [et al.] // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2015. – Vol. 30. – P. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>.
17. Kumar, P. S. Drying kinetics and physico-chemical characteristics of Osmo-dehydrated Mango, Guava and Aonla under different drying conditions / P. S. Kumar, V. R. Sagar // *Journal of Food Science and Technology*. – 2014. – Vol. 51, № 8. – P. 1540–1546. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0658-3>.
18. Vorobiev, E. Fundamentals of electroporation, theory and mathematical models for simulation of PEE processing / E. Vorobiev, N. Lebovka // *Processing of foods and biomass feedstocks by pulsed electric energy* / E. Vorobiev, N. Lebovka. – Cham : Springer, 2020. – P. 27–49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40917-3_2.

19. Шорсткий, И. А. Оценка воздействия импульсного электрического разряда на процесс переноса вещества в растительном материале / И. А. Шорсткий, Д. А. Худяков // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. – 2019. – Т. 368–369, № 2–3. – С. 79–82.
20. Singh, J. S. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development / J. S. Singh, V. C. Pandey, D. P. Singh // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2011. – Vol. 140, № 3–4. – P. 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>.
21. Buckow, R. Pulsed electric field processing of orange juice: a review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability / R. Buckow, S. Ng, S. Toepfl // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2013. – Vol. 12, № 5. – P. 455–467. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12026>.
22. Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits / N. M. Shofian, A. A. Hamid, A. Osman [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2011. – Vol. 12, № 7. – P. 4678–4692. <https://doi.org/10.3390/ijms12074678>.

References

1. Mango production worldwide from 2000 to 2016 (in million metric tons) [Internet]. [cited 2020 Oct 02]. Available from: <https://www.statista.com/statistics/577951/world-mango-production>.
2. Izli N, Izli G, Taskin O. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology*. 2017;37(4):604–612. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.28316>.
3. de Medeiros RAB, Barros ZMP, de Carvalho CBO, Neta EGF, Maciel MIS, Azoubel PM. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. *LWT – Food Science and Technology*. 2016;67:167–173. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.049>.
4. Myakinnikova EI, Kasyanov GI. Application of electrophysical and gas-liquid technologies for drying of fruit raw material. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2015;37(2):48–53. (In Russ.).
5. Aghbashlo M, Hosseinpour S, Ghasemi-Varnamkhasi M. Computer vision technology for real-time food quality assurance during drying process. *Trends in Food Science and Technology*. 2014;39(1):76–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.003>.
6. Chemat F, Fabiano-Tixier AS, Vian MA, Allaf T, Vorobiev E. Solvent-free extraction of food and natural products. *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*. 2015;71:157–168. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.02.021>.
7. Shorstkii I, Koshevoi E. Drying technology assisted by nonthermal pulsed filamentary microplasma treatment: Theory and practice. *ChemEngineering*. 2019;3(4):1–12. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3040091>.
8. Shorstkiy IA. *Primenenie obrabotki impul'snym ehlektricheskim polem biomaterialov pri podgotovke k sushke [Application of pulsed electric field processing of biomaterials in preparation for drying]*. Krasnodar: Izdatel'skiy Dom-Yug; 2020. 172 p. (In Russ.).
9. Parniakov O, Bals O, Lebovka N, Vorobiev E. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2016;35:52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>.
10. Lammerskitten A, Wiktor A, Siemer C, Toepfl S, Mykhailik V, Gondek E, et al. The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*. 2019;252:36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>.
11. Wu Y, Zhang D. Effect of pulsed electric field on freeze-drying of potato tissue. *International Journal of Food Engineering*. 2014;10(4):857–862. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0149>.
12. Pothiraja R, Lackmann J-W, Keil G, Bibinov N, Awakowicz P. Biological decontamination using pulsed filamentary microplasma jet. *NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. 2012;45–55. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2852-3_4.
13. Schoenbach KH, Becker K. 20 years of microplasma research: a status report. *The European Physical Journal D*. 2016;70(2). <https://doi.org/10.1140/epjd/e2015-60618-1>.
14. Nowacka M, Wiktor A, Anuszczywska A, Dadan M, Rybak K, Witrowa-Rajchert D. The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;56:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>.
15. Nowacka M, Fijalkowska A, Dadan M, Rybak K, Wiktor A, Witrowa-Rajchert D. Effect of ultrasound treatment during osmotic dehydration on bioactive compounds of cranberries. *Ultrasonics*. 2018;83:18–25. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.06.022>.
16. Wiktor A, Sledz M, Nowacka M, Rybak K, Chudoba T, Lojkowski W, et al. The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2015;30:69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>.
17. Kumar PS, Sagar VR. Drying kinetics and physico-chemical characteristics of Osmo-dehydrated Mango, Guava and *Aonla* under different drying conditions. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(8):1540–1546. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0658-3>.
18. Vorobiev E, Lebovka N. Fundamentals of electroporation, theory and mathematical models for simulation of PEE processing. In: Vorobiev E, Lebovka N, editors. *Processing of foods and biomass feedstocks by pulsed electric energy*. Cham: Springer; 2020. pp. 27–49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40917-3_2.

19. Shorstkiy IA, Khudyakov DA. Assessment of pulse electric discharge on the process of transfer of substance in plant material. News of institutes of higher education. Food technology. 2019;368–369(2–3):79–82. (In Russ.).

20. Singh JS, Pandey VC, Singh DP. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2011;140(3–4):339–353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>.


21. Buckow R, Ng S, Toepfl S. Pulsed electric field processing of orange juice: a review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2013;12(5):455–467. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12026>.

22. Shofian NM, Hamid AA, Osman A, Saari N, Anwar F, Dek MSP, et al. Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. International Journal of Molecular Sciences. 2011;12(7):4678–4692. <https://doi.org/10.3390/ijms12074678>.

Сведения об авторах


Соснин Максим Дмитриевич

аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: +7 (918) 68-58-201, e-mail: maksim-sosnin7@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6275-6274>

Шорсткий Иван Александрович

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2, e-mail: thegector@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Information about the authors

Maxim D. Sosnin

Postgraduate Student of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russia, phone: +7 (918) 68-58-201, e-mail: maksim-sosnin7@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6275-6274>

Ivan A. Shorstkii

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russia, e-mail: thegector@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>