

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2442>
<https://elibrary.ru/WPBVMS>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Сушка яблочных чипсов с применением интеллектуальной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой



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

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

Поступила в редакцию: 05.09.2022
Принята после рецензирования: 27.10.2022
Принята к публикации: 08.11.2022

*М. Д. Соснин: maksim-sosnin7@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6275-6274>
И. А. Шорсткий: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

© М. Д. Соснин, И. А. Шорсткий, 2023



Аннотация.

Интенсификация процесса сушки с сохранением качества продукта является важной задачей плодоовощной переработки. Ее решение возможно путем комбинирования инфракрасной сушки с применением передовых электрофизических технологий. Цель данной работы заключалась в изучении влияния обработки низкотемпературной атмосферной плазмой на эффективность сушки яблочных чипсов.

Обработке подвергали чипсы из яблок сорта Айдаред (Россия) толщиной 5, 7 и 10 мм. Изучали кинетику сушки и диффузию влаги. Качество готовых яблочных чипсов оценивали по общему содержанию фенолов и флавоноидов, обобщенной антирадикальной активности, цветовым характеристикам и инфракрасному спектру с преобразованием Фурье.

Результаты показали, что индуцированные низкотемпературной атмосферной плазмой каналы (электропоры) в образцах яблочных чипсов имеют древовидную структуру. За счет предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой длительность сушки была снижена на 18,0, 13,0 и 10,5 % для образцов чипсов толщиной 5, 7 и 10 мм соответственно. Отметим снижение удельного энергопотребления процесса сушки на 15–18 % в зависимости от толщины образцов. Предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой способствовала увеличению общего содержания фенолов, флавоноидов и обобщенной антирадикальной активности на 2,5–14,3, 19,1–25,9 и 8,3–35,4 % соответственно по сравнению с контрольным образцом.

Предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой позволяет сократить время сушки плодоовощной продукции и сохранить биологически активные соединения.

Ключевые слова. Плодоовощная продукция, низкотемпературная плазма, сушка, чипсы, качество, кинетика сушки, антирадикальная активность

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ)^{ROR}, № 21-79-00112. Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ)^{ROR} (СКР_3111), развитие которого поддерживается Министерством науки и высшего образования РФ (Минобрнауки России)^{ROR} (Соглашение № 075-15-2021-679).

Для цитирования: Соснин М. Д., Шорсткий И. А. Сушка яблочных чипсов с применением интеллектуальной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 368–383.
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2442>

Cold Atmospheric Gas Plasma Processing of Apple Slices



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

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

Received: 05.09.2022
Revised: 27.10.2022
Accepted: 08.11.2022

*Maxim D. Sosnin: maksim-sosnin7@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6275-6274>
Ivan A. Shorstkii: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

© M.D. Sosnin, I.A. Shorstkii, 2023



Abstract.

The food industry needs more effective drying procedures that would maintain the quality of the original fruit or vegetable. Infrared drying combined with advanced electrophysical technologies may be a perfect solution. The present research objective was to study the effect of low-temperature atmospheric gas plasma treatment on the drying efficiency of apple slices. The research featured apples of the Idared variety (Russia) sliced into pieces of 5, 7, and 10 mm. The experiment involved the parameters of drying kinetics and moisture diffusion. The quality of the apple slices was assessed by the total content of phenols and flavonoids, generalized antiradical activity, color characteristics, and the Fourier transform infrared (FT-IR) spectrum. The electropores induced by the cold atmospheric gas plasma processing had a tree-like structure. The pre-treatment reduced the drying time by 18.0, 13.0 and 10.5% for the samples with a thickness of 5, 7, and 10 mm, respectively. The specific energy consumption decreased by 15–18%, depending on the slice thickness. The pre-treatment also increased the total content of phenols, flavonoids, and antiradical activity by 2.5–14.3, 19.1–25.9, and 8.3–35.4%, respectively. Therefore, the pre-treatment with cold atmospheric gas plasma reduced the drying time and preserved the original biologically active compounds in dried apple slices.

Keywords. Fruit and vegetable products, low-temperature plasma, drying, fruit slices, quality, drying kinetics, antiradical activity

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation (RSF)^{ROR} (No. 21-79-00112) and performed on the premises of the Research Center for Food and Chemical Technologies at the Kuban State Technological University (KubSTU)^{ROR} (СКР_3111), which, in its turn, was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki)^{ROR} (Agreement No. 075-15-2021-679).

For citation: Sosnin MD, Shorstkii IA. Cold Atmospheric Gas Plasma Processing of Apple Slices. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(2):368–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2442>

Введение

Яблоки и их производные являются одними из самых востребованных продуктов питания, обладающих разнообразными полезными и питательными свойствами [1, 2]. Годовое производство яблок в мире составляет около 83 млн т, увеличиваясь на 3 % каждый год [3]. Наряду с объемным потреблением растет количество производимых продуктов на основе яблок, в том числе яблочные чипсы и снеки [4].

Инфракрасная (ИК) сушка, учитывая экономическую эффективность и низкие эксплуатационные расходы, является одним из наиболее распространенных промышленных методов обработки, используемых при производстве фруктовых и овощных чипсов [5, 6]. Однако у ИК-сушки есть ряд недостатков. Например, длительное время обработки при высоких температурах может способствовать сниже-

нию качественных характеристик продукта, таких как вкус, цвет, текстура и питательная ценность [7]. Это связано с малыми скоростями теплообмена, которые могут быть ускорены за счет использования новых «нетепловых» технологий обработки. Кроме того, малые скорости теплообмена, связанные с процессами ИК-сушки, можно увеличить с помощью предварительной обработки, дополненной либо другими методами сушки, либо внешними электрофизическими силами [8]. Комбинирование процесса сушки с такими передовыми технологическими методами обработки, как импульсное электрическое поле, обработка под высоким давлением, СВЧ-обработка, обработка низкотемпературной плазмой и ультразвуком, способствует снижению потерь питательных веществ в обезвоженных продуктах [9]. Сочетание выше-

указанных технологических процессов с ИК-сушкой будет способствовать снижению энергетических затрат в процессе испарения влаги [8].

Методы совершенствования процесса сушки растительных материалов разделились на две основные группы. Первая группа направлена на развитие новых подходов к осуществлению тепломассообменных процессов с использованием высокочастотной и СВЧ-энергии, вакуумной заморозки и перегретого пара низкого давления, которые способствуют не только сокращению длительности сушки и сохранению биоактивных и сенсорных компонентов продукта, но и снижению энергоемкости процесса [10]. Вторая группа включает методы предварительной обработки ультразвуком, импульсным электрическим полем и низкотемпературной плазмой, которые ускоряют процесс сушки за счет модификации капиллярно-пористой структуры, а также повышают как качество, так и сохранность обработанных пищевых продуктов [11]. Авторы S. Tarrí и др. сообщили, что обработка атмосферной газовой плазмой вызывала ингибирование ферментативного потемнения яблочных чипсов наряду со снижением активности полифенолоксидазы [12]. Авторы A. Lammerskitten и др. установили, что влияние импульсного электрического поля с напряженностью 1,07 кВ/см и удельной энергией 5 кДж/кг в сочетании с сублимационной сушкой (60 °С при 0,1 мбар) привело к снижению длительности сушки в два раза [13]. Использование комбинированного подхода воздействия ультразвука и СВЧ способствовало высокой эффективности сушки яблочных чипсов [14].

Целью данной работы являлось исследование применения интеллектуальной технологии обработки низкотемпературной атмосферной плазмой для ускорения процесса сушки яблочных чипсов с сохранением качества получаемого продукта. Для этого в работе реализовали алгоритм оценки предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой в сочетании с инфракрасной сушкой на эффективность сушки яблочных чипсов (кинетику сушки и диффузию влаги) и показатели качества (общее содержание фенолов (TPC) и флавоноидов (TFC), обобщенная антирадикальная активность, антиоксидантная способность, железовосстанавливающая антиоксидантная способность (FRAP), цвет и спектры FT-IR).

Объекты и методы исследования

Яблоки (сорт Айдаред, Россия) хорошего и однородного качества были приобретены у местного производителя. Начальное влагосодержание (в пересчете на массу) в яблоке составило $5,89 \pm 0,1$ (кг воды/кг сухого вещества), определяемое стандартным методом сушильного шкафа [15]. Очищенные яблоки нарезали на диски (наружный

диаметр 60 мм, внутренний диаметр 20 мм, толщина 5, 7 и 10 мм) с помощью нарезной машины MG-381 (Magio, Китай). Толщина дисков яблок была выбрана из-за возможности сравнительного анализа с литературными данными и предпочтительной товарной толщины продукта (5–12 мм) [16]. После нарезки яблоки отправляли на электрофизическую обработку.

Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой. Принцип работы экспериментальной установки, в соответствии с запатентованной технологией [17], показан на рисунке 1. Для генерации низкотемпературной атмосферной плазмы в воздушном зазоре использовали конфигурацию электродов типа «точка – пластина», которая включала пластину из нержавеющей стали в качестве заземленного электрода и точечный стальной электрод диаметром 1 мм в качестве высоковольтного электрода в диэлектрическом держателе. Зазор между электродами равен 15 мм. Камера обработки имела квадратную форму (длина 20 см), изготовленную из диэлектрического материала. Заземленный электрод в диэлектрическом держателе был установлен на позиционной платформе с двумя шаговыми двигателями для обеспечения перемещения по оси X–Y (рис. 1а). Траекторию движения (красная зигзагообразная линия) задавали с помощью авторской интеллектуальной системы распознавания объектов (рис. 1б). Траекторию задавали для максимальной обработки поверхности яблочных дисков. Сразу после процедуры обработки яблочные диски сушили в инфракрасном сушильном шкафу.

Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой была выполнена с использованием высоковольтной системы питания (Matsusuda AMPS 20B20, Япония) в сочетании с функциональным генератором Agilent [18]. В поставленных экспериментах длительность импульса и частота микроплазменного разряда составляли 50 мкс и 100 Гц соответственно. Выбранные электрические параметры позволили точно контролировать обработку ткани яблок в сочетании со скоростью перемещения электрода. Каждый импульс подавал напряжение до 14 кВ. Кроме того, при предварительной обработке низкотемпературной атмосферной плазмой использовались положительные импульсы с напряженностью электрического поля 8 кВ/см. Средняя удельная потребляемая энергия для предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой составила 1,7 кДж/кг при 6000 разрядах. Общее время обработки составило 60 с. Разница температуры между предварительно обработанными низкотемпературной атмосферной плазмой яблочными чипсами и контрольным образцом составила менее 2 °С, ее измерили с помощью термомпары Т-типа.

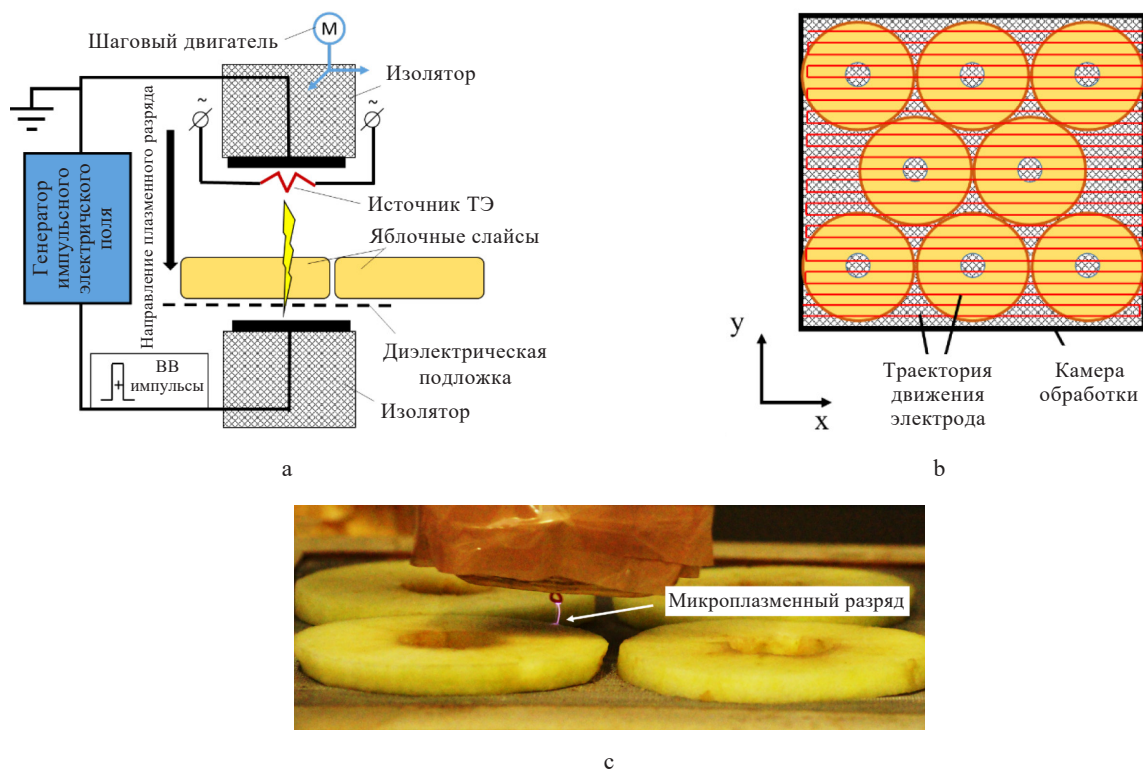


Рисунок 1. Принцип работы экспериментальной установки: а – схема экспериментальной установки для предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой; б – траектория движения электрода в камере обработки; в – процесс обработки яблочных чипсов низкотемпературной атмосферной плазмой

Figure 1. Experimental setup for apple slices: a – experimental setup for pre-treatment with cold atmospheric gas plasma; b – electrode trajectory in the processing chamber; c – processing with cold atmospheric gas plasma

ИК-сушка. Эксперименты по сушке проводились в лабораторной ИК-сушилке. Расстояние между яблочными чипсами и двумя ИК-лампами (Ballu ВПН-1-0.3, Китай) составило 10 см. В установленном режиме был получен средний радиационный тепловой поток $0,11 \text{ Вт/м}^2$ с длиной волны излучения 3 мкм. Рабочие параметры были выбраны на основе литературных данных о глубине проникновения ИК-излучения в ткани яблок (около 10 мм при длине волны 3 мкм) [19]. Во время эксперимента с ИК-сушкой потеря влаги образцами яблочных чипсов измерялась с интервалом 10 мин. ИК-сушку продолжали до тех пор, пока конечное содержание влаги в образцах не достигло $\sim 0,06 \text{ г/100 г}$ сухого вещества. Значение конечного содержания влаги было выбрано исходя из условий дальнейшего хранения яблочных чипсов.

Аналитические методы анализа. Кинетика сушки. Кривые сушки контрольных и предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой образцов яблочных чипсов были проанализированы с использованием моделей тонкослойной сушки [20]. Измерение кинетики сушки проводили с помощью анализатора влажности

НС103 (Mettler Toledo, Швейцария). Коэффициент влажности (MR) образцов яблочных чипсов в процессе сушки рассчитывали по уравнению (1) [21]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

где M_t – содержание влаги в любой момент времени t , кг воды/кг сухого вещества; M_0 – начальное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества; M_e – равновесное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества. В уравнении (1) значение M_e мало, поэтому уравнение можно упростить до вида $MR = M_t/M_0$.

Скорость сушки (DR , кг/кг·с) образцов яблок в любой момент времени t может быть рассчитана по уравнению (2):

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

где M_t – содержание влаги в момент времени t , кг воды/кг сухого вещества; $M_{t+\Delta t}$ – содержание влаги за промежуток времени $t+\Delta t$, кг воды/кг сухого вещества; Δt – промежуток времени между замерами, с.

Диффузионная способность влаги. Коэффициент диффузии в каждом эксперименте определяли в соответствии с подходом [7]. Предполагается, что сушка проходит в периоде подающей скорости, и диффузия влаги управляет процессом, поэтому для описания можно использовать второй закон диффузии Фика (3) [16]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

где t – время сушки, с; D_{eff} – эффективная диффузия влаги, м²/с; L – характерный геометрический параметр (половина толщины яблочных дисков).

Уравнение (3) дополнительно упрощается до уравнения (4) длительным периодом процесса сушки:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

Натуральный логарифм уравнения (4) → (5) коррелирует с линейным уравнением (6).

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

$$y = y_0 + ax \quad (6)$$

Энергетические аспекты ИК-сушки и предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой. Удельное потребление энергии ($W_{уд}$) было рассчитано следующим образом [22]:

$$W_{уд} = \frac{W_{ИК} + W_{НАП} + W_{ТЭ}}{M_b} \quad (7)$$

где $W_{ИК}$ – энергопотребление ИК-сушилки, кВт/ч; $W_{НАП}$ – энергопотребление низкотемпературной атмосферной плазмы на стадии предварительной обработки, кВт/ч; $W_{ТЭ}$ – энергопотребление источника термоэлектронной эмиссии на стадии предварительной обработки, кВт/ч; M_b – масса выпаренной воды, кг. Значения $W_{ИК}$ и $W_{ТЭ}$ были получены с помощью измерителя мощности в процессе экспериментов. Значение $W_{НАП}$ определяли по вольт-амперной характеристике, описанной в [23], с помощью уравнения (8):

$$W_{НАП} = n \times \int U(t) \times I(t) \times dt \quad (8)$$

где n – количество импульсов; $U(t)$ – мгновенные напряжения на электродах; $I(t)$ – ток разряда, проходящий через образец.

Анализ качества высушенных чипсов. Определение качества предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и контрольных образцов яблочных чипсов, высушен-

ных ИК-сушкой, включало в себя оценку цветовых характеристик, общее содержание флавоноидов и фенолов, антирадикальную активность, а также результаты Фурье инфракрасной спектроскопии.

Цветовые параметры. Цвет образцов измеряли с помощью колориметра Konica Minolta CR-400 (Осака, Япония). Цветовой эксперимент был проведен пять раз, значения были выражены в шкале CIE $L^*a^*b^*$ (L – яркость, a – диапазон цвета от зеленого до красного, b – диапазон цвета от синего до желтого). Общую разницу в цвете (ΔE) определяли в соответствии с уравнением (9), изложенным в [13]:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (9)$$

где ΔL , Δa и Δb – разности между значениями, измеренными для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и контрольных образцов, высушенных в ИК-сушилке.

Общее содержание флавоноидов (TFC). Для оценки наличия и уровня флавоноидов для определения TFC образцов использовали колориметрический метод с незначительными изменениями [24]. Для этого 10 мл образца помещали в мерную колбу, содержащую ~ 1 мл 5 % (по массе) нитрита натрия, и выдерживали в течение ~ 6 мин, после чего проводили реакцию с ~ 1 мл 10 % (по массе) нитрата алюминия для образования флавоноидно-алюминиевого комплекса. Через 6 мин добавляли 10 мл ~ 4 % (по массе) NaOH и около 25 мл дистиллированной воды. Через ~ 15 мин при температуре окружающей среды конечный раствор снова тщательно перемешивали. После этого с помощью УФ-спектрофотометра (Specord 200 Plus, Analytical Jena, Германия) определяли поглощение, по сравнению с заготовкой, при 510 нм. В TFC использовалась калибровочная кривая стандарта катехина. TFC образцов были выражены в миллиграммах эквивалентов катехина (CE) на 100 г исходного вещества.

Общее содержание фенолов (TPC). Для оценки наличия и уровня фенольных соединений для определения параметра TPC образцов использовался анализ Фолина-Чокальтеу с незначительными изменениями [24]. Приблизительно 0,5 мг измельченной пробы смешивали с 1,5 мл дистиллированной воды, из которой отбирали 100 мкл раствора, и встряхивали в течение 1 мин с 500 мкл реагента Фолина-Чокальтеу (предварительно разбавленного водой 1:1 в/в) и 6 мл дистиллированной воды. После завершения тщательного перемешивания добавляли 2 мл 15 % карбоната натрия и снова перемешивали в течение примерно 30 с. Смесь довели до объема 10 мл путем добавления дистиллированной воды, а затем выдерживали в течение 2 ч при температуре окружающей среды. Затем с помощью стеклянных кювет измеряли параметр поглощения на длине волны 750 нм с помощью

УФ-спектрофотометра (Specord 200 Plus, Analytical Jena, Германия). Согласно G. Y. Y. Faria и др. галловая кислота (0–150 мкг/мл) служила стандартом для построения ее калибровочной кривой [25]. ТРС был представлен в пересчете на миллиграмм эквивалента галловой кислоты на грамм сырой массы (мг GAE/г сухого вещества).

Антирадикальная активность. Антирадикальная активность по поглощению свободных радикалов является известным показателем. В данной работе антирадикальную эффективность образцов по поглощению свободных радикалов определяли по методу DPPH, описанному в [26] с небольшими изменениями. Для этого использовали 80 %-ный этанол, который смешивали с яблочными экстрактами до конечной концентрации в диапазоне 1,10–1,61 мг сухого вещества/мл. Затем добавляли 2 мл раствора DPPH, кратковременно перемешивали и выдерживали в темноте в течение ~ 30 мин с последующим измерением поглощения при длине волны 515 нм с использованием УФ-спектрофотометра (Specord 200 Plus, Analytical Jena, Германия). Активность по поглощению свободных радикалов DPPH (%) определяли по уравнению (10), которое изложено в [27]:

$$\text{Активность DPPH} = \frac{(A_0 - A_1)}{A_0} \times 100 \quad (10)$$

где A_0 – контрольный образец; A_1 – абсорбционный образец. Эффект очистки относится к проценту активности по удалению свободных радикалов.

Антиоксидантная способность. На образцах провели анализ антиоксидантной способности по методу FRAP (ferric reduce antioxidant power) с небольшими изменениями [28]. Реагент FRAP был приготовлен из ацетатного буфера (pH 3,6), включающего ~ 10 ммоль раствора TPTZ, 40 ммоль HCl и 20 ммоль раствора хлорида железа (III) в соответствующих пропорциях 10:1:1 (по объему). Реагент FRAP перед использованием нагревали до 37 °С. Приблизительно 50 мкл образца добавляли к 1,5 мл реагента FRAP, затем перемешивали в течение ~ 1 мин и выдерживали в темноте в течение ~ 30 мин. Увеличение поглощения реакционной смеси определяли на длине волны 593 нм с помощью УФ-спектрофотометра (Specord 200 Plus, Analytical Jena, Германия) относительно рабочего агента FRAP, который служил заготовкой. Результаты анализов FRAP выражали ммоль/кг.

Инфракрасная Фурье-спектроскопия (FT-IR). Функциональные группы в образцах, были измерены с помощью FT-IR-спектроскопии с небольшими изменениями [29]. Прибор FT-IR (спектрометр FT-IR Spectrum Two, Массачусетс, США) использовался для определения спектроскопии FT-IR предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и необработанных образцов.

Образец (~ 2 мг) измельчали, а затем смешивали с порошкообразным бромистым калием (1:100) и формировали цирический диск. Спектральный диапазон 4000–400 см⁻¹ служил способом для получения спектра с помощью программного обеспечения Spectrum. Для каждого образца было усреднено 32 сканирования со спектральным разрешением 4 см⁻¹. В дополнение к нормализации всех спектров было выполнено 5 запусков в тех же условиях, что и в рекомендациях [30].

Статистический анализ. Все эксперименты проводили с трехкратной повторностью. Для оценки достоверных различий между исследуемыми параметрами был проведен дисперсионный анализ по методике ANOVA при $\alpha = 0,05$ и методу Tukey. Статистический анализ проводился с помощью программ STATISTICA 13 (Statsoft, США) и Excel (Microsoft, США).

Результаты и их обсуждение

Визуальный эффект от обработки низкотемпературной атмосферной плазмой. Образцы яблочных чипсов, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой (НАП) и

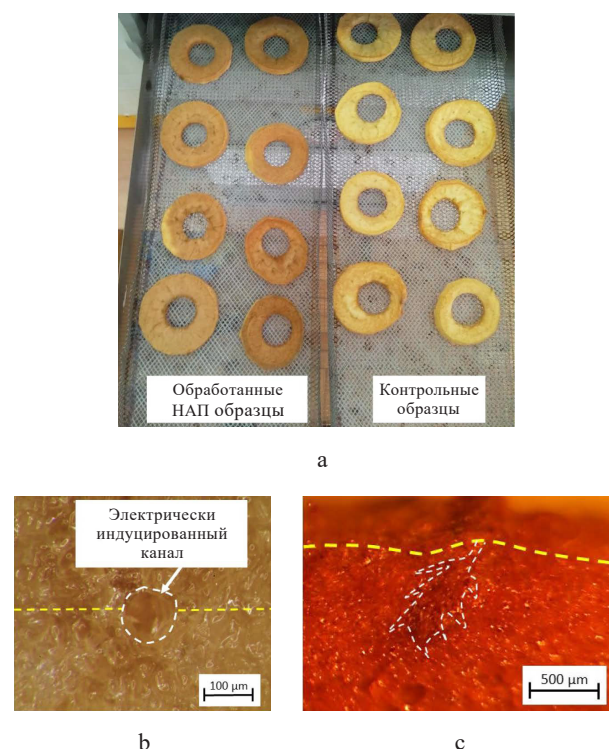


Рисунок 2. а – сушка яблочных чипсов в ИК-сушилке; б – изображение электрически индуцированного канала после предварительной обработки; в – поперечное сечение канала

Figure 2. Drying apple slices in an IR dryer (a); electropores after pretreatment (b); electropore in cross section (c)

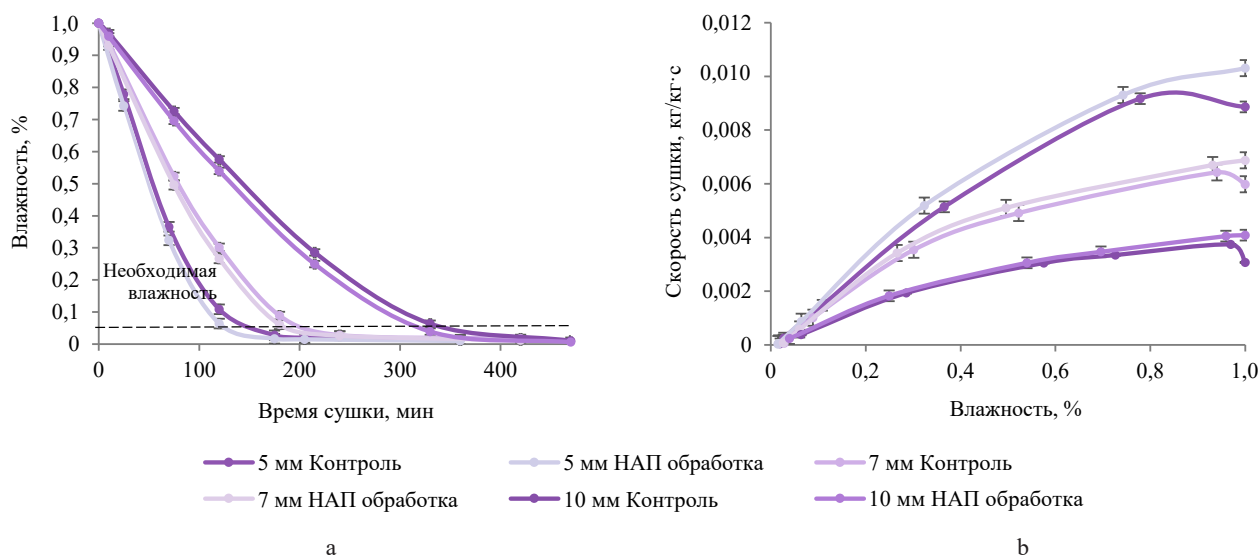


Рисунок 3. Кинетика (а) и скорость сушки (б) яблочных чипсов различной толщины (5, 7 и 10 мм) до и после предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой (НАП)

Figure 3. Kinetics (a) and drying rate (b) of apple slices of various thicknesses (5, 7 and 10 mm) before and after pre-treatment with cold atmospheric gas plasma

необработанных (контрольных), показаны на рисунке 2а. Потемнение является основным визуальным эффектом в образцах яблок, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой. Данный эффект подтвердился авторами N. Karim и др. на грибах Шийтаке, подвергнутых диэлектрическому барьерному разряду в потоке низкотемпературной плазмы в течение 10 мин при 135 л/мин [11]. Авторы объясняют данный эффект взаимодействием кислорода, проникающего через структуру ткани и вступающего в реакцию с фенольными соединениями. Изображение электрически индуцированного канала на яблочных чипсах и поперечное сечение канала через желтую линию в высушенном образце показаны на рисунке 2b и 2c соответственно. В процессе обработки низкотемпературной атмосферной плазмой электрически индуцированный канал, проходящий через всю поверхность и толщину яблочных чипсов, сопровождается образованием электрической древесной структуры, изображенной белой пунктирной линией (рис. 2с) [31]. Диаметр электроиндуцированного канала на поверхности составлял в среднем 110 мкм. По сравнению с другими методами плазменной обработки предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой позволяет получать каналы большего диаметра, что влияет на процесс массопереноса. В других растительных материалах импульсный микрозаряд приводил к образованию поверхностных каналов диаметром 60 мкм, которые напоминали микроотверстия [32]. Такие электроиндуцированные каналы были об-

наружены на поверхности перца после воздействия плазмы [33]. Эффект от предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой сравнивается с прокалыванием тонкой иглой [18]. Электрически индуцированные каналы могут заполняться внутриклеточной жидкостью, которая под воздействием тургорного давления клетки появляется на поверхности материала.

Кинетика и скорость сушки. На рисунке 3 показана кинетика и скорость сушки яблочных чипсов различной толщины (5, 7 и 10 мм) до и после предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой. Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой улучшает кинетику сушки яблочных чипсов за счет формирования электрически индуцированных каналов с древесной структурой, которые снижают сопротивление переносу влаги во время процесса сушки. Аналогичный результат был получен X. Zhang и др., которые обработали перец чили холодной плазмой и обнаружили, что время сушки после предварительной обработки сократилось [33]. Аналогичное объяснение образования микроотверстий было представлено Y. H. Zhou и др. при обработке волчьей ягоды [34]. В наших экспериментах время сушки уменьшилось на 18, 13 и 10,5 % для яблочных чипсов толщиной 5, 7 и 10 мм соответственно. Время сушки контрольных и обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой образцов снижалось с уменьшением начальной толщины яблок. Период снижения скорости диффузии, который варьировался между контрольными и предварительно обработанными низкотем-

пературной атмосферной плазмой образцами, является доминирующим физическим механизмом метода ИК-сушки [8]. В отличие от контрольных образцов, где скорость сушки достигла пика только через ~ 10 мин, скорость сушки яблочных чипсов, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой, достигла своего пика в начале процесса сушки. Такое поведение кривой скорости сушки показало, что скорость испарения влаги с поверхности образца, предварительно обработанного низкотемпературной атмосферной плазмой, выше той, которая происходила изнутри. Возможно, что около 3–5 % начальной влаги могло быть преобразовано в свободную жидкость из поверхностных пор материала, предварительно обработанного низкотемпературной атмосферной плазмой [35]. Это соответствует эффектам, о которых сообщалось для ткани яблока, предварительно обработанной импульсным электрическим полем, и ткани картофеля после обработки микроплазмой [18, 36].

Процесс сушки должен проводиться бережно, чтобы сохранить не только внешний вид и аромат, но и цвет, вкус и питательные свойства исследуемого пищевого продукта [37]. На рисунке 3 показано, что кривые скорости сушки могут различаться по двум периодам: короткий период доминирующего физического механизма термодиффузии и период снижения скорости осмотического и адсорбционного испарения влаги. Образцы, предварительно обработанные низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенные в ИК-сушилке, будут приводить к более быстрому снижению влажности, по сравнению с контрольными образцами, что согласуется с предыдущими исследованиями [38]. Однако это не сходится с исследованием обработки плазмой плодов Тукумы, результаты которого привели к снижению длительности сушки в два раза [10]. По мнению авторов, предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой может привести к повышению температуры до 14 °С в течение 5 мин (время обработки) для данного образца весом 15 г. Например, Y. H. Zhou и др. сообщили, что холодная плазма повысила эффективность сушки волчьей ягоды на 50 % [34]. S. H. Miraei Ashtiani и др. отметили, что предварительная обработка плазмой скользящей дуги сокращает время сушки и потребление энергии до 26,27 и 26,30 % соответственно [22]. Таким образом, предварительная обработка ягоды может привести к повышению эффективности сушки.

Можно предположить, что при мелкосерийном производстве фруктовых чипсов (около 9 т сырья в месяц) технология предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой может увеличить производство примерно на 1,1 т в месяц. Это может обеспечить дополнительный доход,

который увеличит как норму прибыли, так и окупаемость инвестиций в оборудование низкотемпературной атмосферной плазмы. Разрабатываемые нашей исследовательской группой технологии предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой показывают большие перспективы, особенно в обеспечении текстурных и органолептических характеристик высушенных яблочных чипсов. Это происходит в результате использования стабилизированной формы распределения электрического поля.

Влияние обработки низкотемпературной атмосферной плазмой на структуру ткани. В последние десятилетия все больший интерес вызывает влияние систем ИК-сушки на сельскохозяйственную продукцию [6]. В данном исследовании с целью оценки эффективной диффузионной способности (D_{eff}) были построены зависимости натурального логарифма $\ln(MR)$ от времени сушки (рис. 4). В таблице 1 показана зависимость между $\ln(MR)$ и временем сушки для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и контрольных яблочных чипсов, высушенных в ИК-сушилке. Взаимосвязь между $\ln(MR)$ и временем сушки показывает высокую схожесть ($R^2 > 0,9$) для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-режиме и контрольных яблочных чипсов. Однако диапазон рассчитанных значений D_{eff} между $1,4 \times 10^{-9}$ и $3,2 \times 10^{-9}$ м²/с для образцов яблочных чипсов

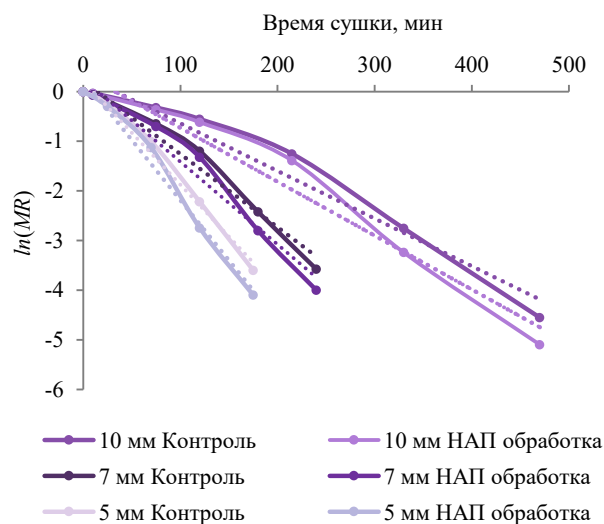


Рисунок 4. Зависимость между $\ln(MR)$ и временем сушки для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой (НАП) + ИК-сушкой и контрольных яблочных чипсов

Figure 4. Effect of drying time on $\ln(MR)$ for apple slices pre-treated with cold atmospheric gas plasma and IR drying vs. control

Таблица 1. Зависимость между $\ln(MR)$ и временем сушки (t) для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой и контрольных яблочных чипсов

Table 1. Effect of drying time (t) on $\ln(MR)$ for apple slices pre-treated with cold atmospheric gas plasma and IR drying vs. control

Толщина образца, мм	Образец	Уравнение линейной регрессии	R^2
10	Контроль	$\ln(MR) = -0.00016t + 0.31872$	0,964
	Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой	$\ln(MR) = -0.00018t + 0.35640$	0,965
7	Контроль	$\ln(MR) = -0.00025t + 0.21760$	0,969
	Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой	$\ln(MR) = -0.00026t + 0.19833$	0,974
5	Контроль	$\ln(MR) = -0.00035t + 0.21630$	0,984
	Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой	$\ln(MR) = -0.00040t + 0.23694$	0,984

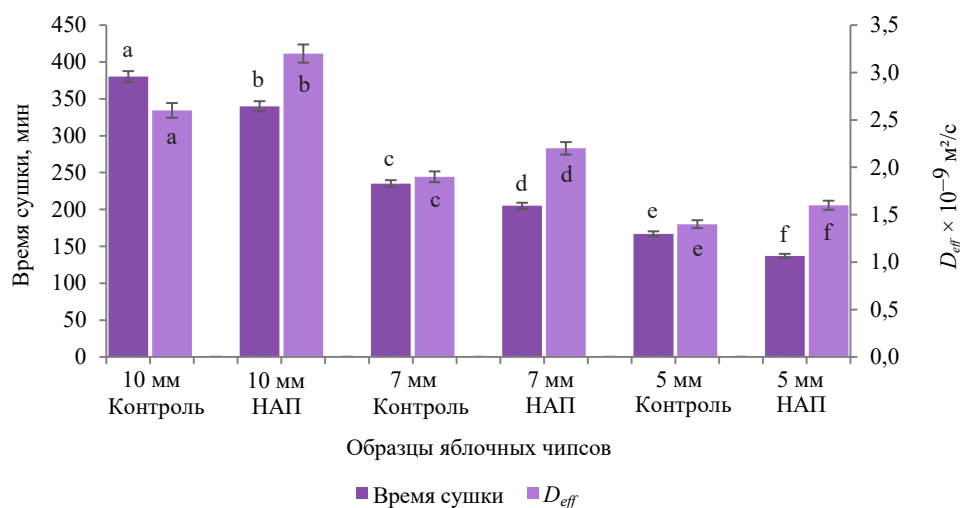


Рисунок 5. Оценка эффективной диффузионной способности в зависимости от толщины яблочных чипсов

Figure 5. Diffusion capacity depending on apple slice thickness

(рис. 5) отчасти согласуется с данными сушки, представленными F. Salehi и M. Satorabi, которые подтверждают диапазоны 10^{-11} и $10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [7]. Следовательно, увеличение значений D_{eff} до $3,2 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ (~ 23,1 % увеличения) для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов толщиной 10 мм (рис. 4) может подтвердить наличие электрически индуцированных каналов, полученных после обработки [18]. Изменения микроструктуры поверхности, вызванные предварительной обработкой низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой, могут ускорить перенос молекул воды на поверхность образца через модифицированную капиллярно-пористую структуру. Такие (микроструктурные) изменения могут привести к испарению влаги с поверхности, особенно в процессе сушки [9].

Различия в значениях D_{eff} для яблочных чипсов толщиной 5, 7 и 10 мм (рис. 5) могут свидетельствовать не только о более высоком удельном сопротивлении материала, но и об ограниченной проницаемости микроплазменного разряда. Это

позволяет предположить, что влияние обработки низкотемпературной атмосферной плазмой на капиллярно-пористую структуру растительной ткани должно представлять интерес для дальнейшего изучения. Тем не менее минимизация энергопотребления является ключевым фактором для успешного промышленного применения при оптимизации процесса сушки.

Осциллограмма тока и напряжения разряда с предварительной обработкой низкотемпературной атмосферной плазмой со шкалой показана на рисунке 6а. Влияние предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой на удельное энергопотребление ($W_{уд}$) ИК-излучения, в зависимости от толщины яблочных чипсов, показано на рисунке 6б. Используя уравнение (9), осциллограмму тока и напряжения, рассчитали значение $W_{НАП}$. Общее удельное потребление энергии $W_{уд}$ для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой яблочных чипсов было ниже, чем у контрольных образцов ($p < 0,05$). Значения $W_{уд}$ предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой зави-

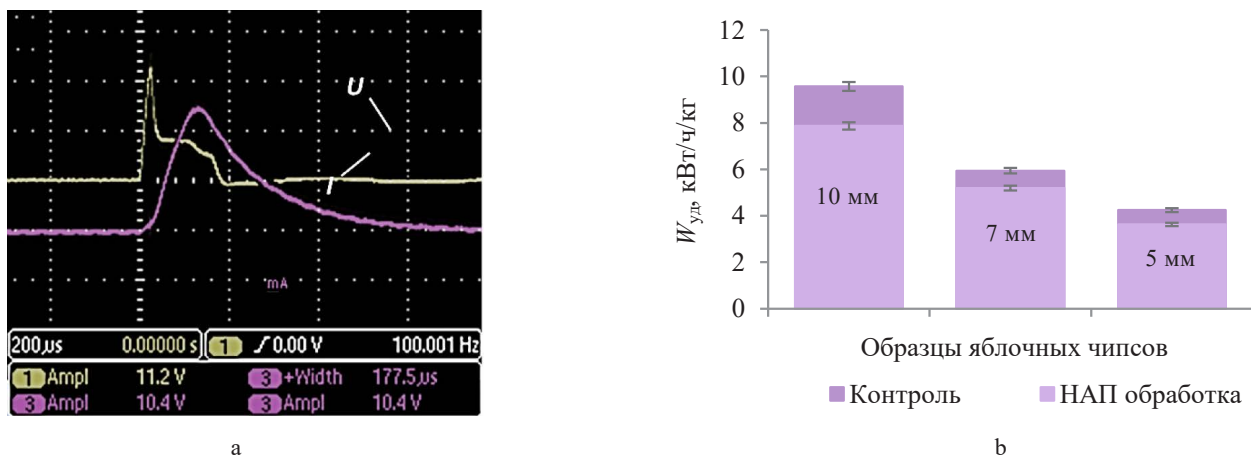


Рисунок 6. а – осциллограмма тока и напряжения разряда с предварительной обработкой низкотемпературной атмосферной плазмой (НАП); б – влияние предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой на удельное энергопотребление ($W_{уд}$) ИК-излучения в зависимости от толщины яблочных чипсов

Figure 6. Oscilloscope of current and discharge voltage after preliminary cold atmospheric gas plasma processing (a); effect of cold atmospheric gas plasma pre-treatment on specific energy consumption ($W_{уд}$) of IR radiation depending on apple slice thickness (b)

Таблица 2. Значения цвета свежих и обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов

Table 2. Color values of fresh apple slices vs. experimental sample pre-treated with cold atmospheric gas plasma and IR-dried

Образец	Толщина образца, мм	L^*	a^*	b^*	ΔE
Контроль		$77,0 \pm 4,4^a$	$-2,5 \pm 0,9^{ab}$	$17,6 \pm 3,0^a$	–
Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой	5	$68,1 \pm 1,8^c$	$1,5 \pm 0,7^{ab}$	$23,35 \pm 1,23^{ab}$	$14,30 \pm 1,17^a$
	7	$70,4 \pm 1,6^b$	$-0,50 \pm 0,85^{ab}$	$19,51 \pm 1,27^a$	$19,25 \pm 1,27^b$
	10	$75,7 \pm 2,9^a$	$-1,68 \pm 0,54^{ab}$	$18,87 \pm 1,69^a$	$20,730 \pm 1,619^{bc}$
Обработка ИК-сушкой	5	$41,10 \pm 1,51^c$	$8,17 \pm 0,52^c$	$26,02 \pm 1,88^{abc}$	$39,58 \pm 0,86^c$
	7	$47,05 \pm 0,93^d$	$8,28 \pm 1,90^{ab}$	$24,32 \pm 2,77^a$	$34,57 \pm 1,46^d$
	10	$50,88 \pm 1,89^{bc}$	$6,33 \pm 0,88^{bc}$	$20,91 \pm 0,90^{dc}$	$30,41 \pm 1,25^f$
Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой	5	$36,49 \pm 0,90^b$	$8,49 \pm 1,08^{abc}$	$38,87 \pm 1,69^a$	$44,63 \pm 1,32^g$
	7	$41,93 \pm 1,44^{ef}$	$9,39 \pm 1,15^{bc}$	$30,08 \pm 2,55^{dc}$	$39,20 \pm 1,44^h$
	10	$42,46 \pm 1,44^c$	$10,55 \pm 0,58^a$	$29,94 \pm 0,93^f$	$38,79 \pm 1,04^c$

Данные выражаются в виде среднего значения \pm стандартное отклонение. Разные буквы в одной строке показывают, что средние значения отличаются при уровне достоверности 95 % ($p < 0,05$). L^* – светлота; a^* – диапазон цвета от зеленого до красного; b^* – диапазон цвета от синего до желтого; ΔE – разница в цвете.

Data are expressed as mean \pm standard deviation. Different letters indicate that the means are different at a 95% confidence level ($p < 0.05$). L^* stands for lightness; a^* indicates the color range from green to red; b^* is the color range from blue to yellow; ΔE is the color difference.

сят от характеристик плазменного разряда. Сопротивление и напряжение увеличиваются с повышением толщины материала по мере уменьшения тока. Поскольку значения $W_{НАП}$ и $W_{ТЭ}$ ниже, чем $W_{ИК}$, то затратами энергий для предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой можно пренебречь, что характерно для текущего исследования. Эффективность предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой может привести к снижению энергопотребления сушки. Таким образом, применение обработки низкотемпературной атмосферной плазмой снижает удельное энергопотребление процесса

сушки яблочных чипсов на 15–18 % в зависимости от толщины материала.

Цветовые параметры L^* , a^* , b^* и ΔE . Цвет играет важную роль в идентификации продукта, помимо визуального внешнего вида. Цвет пищевого продукта может изменяться в процессе его обработки, что помогает в определении его готовности. В данной работе значения цвета контрольных и предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой + высушенных в ИК-режиме яблочных чипсов показаны в таблице 2. По сравнению с контролем были обнаружены изменения ($p < 0,05$) в цветовых характеристиках L^* , a^* , b^* и ΔE . Значения L^* в пред-

варительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсах снизились ($p < 0,05$) по сравнению с контролем. Это связано с явлением электропорации и внутриклеточного окисления [22]. Кроме того, сниженное значение L^* , по сравнению с контролем, может свидетельствовать о более темной ткани яблок, предварительно обработанной низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенной в ИК-сушилке. С помощью микроплазменного разряда предварительно обработанный низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенный в ИК-режиме яблочный чипс толщиной 5 мм отличался ($p < 0,05$) от чипсов с толщиной 7 и 10 мм. Это говорит о различных значениях D_{eff} (рис. 6) и предполагает ограниченную проницаемость проникновения низкотемпературной атмосферной плазмы через структуру ткани яблока. Время сушки контрольных и обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой образцов уменьшалось с сокращением начальной толщины яблочных чипсов.

Сравнивая образцы, предварительно обработанные низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенные в ИК-режиме, с контрольными образцами, значение b^* увеличилось (более глубокий желтый тон) в диапазоне от 12–25 %. Значения a^* и b^* для предварительно обработанного низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенного в ИК-режиме диска яблока толщиной 5 мм оказались выше ($p < 0,05$), чем для дисков толщиной 7 и 10 мм, а также для контроля. Такое повышение значений a^* обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в инфракрасном режиме яблочных чипсов может указывать на изменения в процессах карамелизации и на начальную стадию реакции Майяра, химическое окисление фенолов и окисление аскорбиновой кислоты. Кроме того, изменения значений ΔE между предварительно обработанными низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенными в ИК-режиме яблочными чипсами и другими чипсами могут указывать на инактивацию окислительных ферментов, которая произошла из-за дальнейшего воздействия кислорода (табл. 2). Плазменный разряд, неспособный полностью проникнуть в структуру ткани яблочных чипсов, препятствовал активации окислительных ферментов (полифенолоксидазы и пероксидазы). Основываясь на результатах, представленных в таблице 2, ΔE предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов может указать на образование новых (цветных) пигментов. Значения L^* и a^* для обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных яблочных чипсов увеличивались с повышением начальной толщины яблока, значения b^* и ΔE уменьшались.

Общее содержание фенолов (TPC) и флавоноидов (TFC). Отдельные области биологических растений содержат разное количество фитохимических веществ с различной биологической активностью. Среди них флавоноиды, фенольные соединения и т. д., способные подавлять чрезмерную выработку свободных радикалов [39]. В данной работе были изучены параметры TPC и TFC для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой образцов, высушенных в ИК-сушилке, и контрольных образцов яблочных чипсов (табл. 3). После ИК-сушки содержание TPC в необработанных яблочных чипсах осталось неизменным, что соответствует ранее сообщенным данным (850 мг/100 г) [40]. TPC демонстрировал тенденцию к снижению с увеличением толщины материала (~ 854 мг/100 г для 7 мм и ~ 841 мг/100 г для 10 мм), достигая максимума при толщине 5 мм, предварительно обработанного низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенного в ИК-сушилке (~ 889 мг/100 г), но наименьшего для контрольного (~ 560 мг/100 г) образца яблочных чипсов. Этот факт может быть связан с дезинтеграцией клеточной мембраны, которая способствовала высвобождению фенольных соединений [40]. Относительно низкий TPC у яблочных чипсов, высушенных в ИК-сушилке, можно объяснить коротким временем сушки. У предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушке яблочных чипсов толщиной 5 мм TPC увеличивается на 14,3 % по сравнению с контрольным образцом. О подобном увеличении TPC сообщалось в других источниках. Например, когда к тканям яблок и моркови применяли обработку импульсным электрическим полем, а к яблочному соку – плазму диэлектрического барьерного разряда [41–43].

Фенольные соединения способствуют повышению питательных качеств/ценности растительных продуктов, они зарекомендовали себя в изменении аромата, цвета и вкуса [39]. Как показано в таблице 3, при ИК-сушке с предварительной обработкой низкотемпературной атмосферной плазмой толщина яблочных чипсов влияет на TFC ($p < 0,05$). Кроме того, различия в TFC являются приемлемыми при сравнении предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов толщиной 5 и 10 мм. На основании результатов, представленных в таблице 3, значения TPC и TFC уменьшались с увеличением начальной толщины яблока.

Кроме того, при ИК-сушке яблочных чипсов параметр TFC был наименьшим (~ 374 мг/100 г массы), тогда как в контрольном образце он был максимальным (~ 490 мг/100 г массы). Сравнивая предварительно обработанные низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-высушенные образцы с другими образцами, тенденция изменений

Таблица 3. Общее содержание фенолов (TPC) и флавоноидов (TFC), антирадикальная активность, а также параметр антиоксидантной способности в контрольных образцах яблочных чипсов и в образцах, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой и ИК-сушкой

Table 3. Total content of phenols, flavonoids, antiradical activity, and the antioxidant capacity parameter in samples pre-treated with cold atmospheric gas plasma + IR drying vs. IR drying vs. control apple slices

Образец	TPC, мг/100 г	TFC, мг/100 г	Антирадикальная активность, мг/мл	Антиоксидантная способность, ммоль/кг
Контроль	560,0 ± 11,7 ^a	490,0 ± 11,3 ^a	0,85 ± 0,06 ^a	27,65 ± 1,98 ^a
Обработка ИК-сушкой	706,0 ± 14,4 ^b	374,0 ± 10,5 ^{ab}	0,73 ± 0,05 ^{ab}	19,53 ± 1,69 ^{ab}
Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой (5 мм)	889,0 ± 14,2 ^b	462,0 ± 12,1 ^b	0,98 ± 0,07 ^b	29,90 ± 2,27 ^b
Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой (7 мм)	854,0 ± 13,2 ^c	409,0 ± 10,7 ^c	0,87 ± 0,06 ^c	28,72 ± 2,90 ^c
Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-сушкой (10 мм)	841,0 ± 12,9 ^d	382,0 ± 13,3 ^d	0,81 ± 0,06 ^{cd}	22,12 ± 2,23 ^d

Данные выражаются в виде среднего значения ± стандартного отклонения. Разные буквы в одной строке показывают, что средние значения отличаются при уровне достоверности 95 % ($p < 0,05$). Условные обозначения: TPC – общее содержание фенолов; TFC – общее содержание флавоноидов; DPPH – антиоксидантная активность; FRAP – восстанавливающая/антиоксидантная способность, снижающая содержание железа.

Data are expressed as mean ± standard deviation. Different letters indicate that the means are different at a 95% confidence level ($p < 0.05$). TPC stands for total phenol content; TFC indicates total nutrition of flavonoids; DPPH is antioxidant activity; FRAP is a repair/antioxidant ability to reduce iron content.

параметра TFC сопоставляется с изменениями параметров некоторых цветовых характеристик (табл. 2). Учитывая эти тенденции TFC и TPC, применение к яблочным чипсам предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой в сочетании с ИК-сушкой привело к частичной инактивации ферментов полифенолоксидазы. Это наблюдение требует дальнейших исследований, особенно механизмов, регулирующих взаимодействия между фенольными веществами и реакционноспособными микроплазменными формами. Кроме того, флавоноиды в яблоках остаются среди полифенолов, занимая около 45–48 % от общей антиоксидантной способности [21].

Анализ антирадикальной активности и антиоксидантной способности, снижающей содержание железа. Параметр антирадикальной активности, с одной стороны, как основа многих других биологических функций представляет собой способность биоактивного соединения поддерживать функцию и структуру клетки [44]. С другой стороны, параметр антирадикальной активности направлен на измерение антиоксидантной силы, основанной на восстановлении комплекса Fe^{3+} трипиридилтриазина ($Fe(TPTZ)^{3+}$), который при низком pH приобретает интенсивный синий цвет [45]. Результаты антирадикальной активности, измеренные с помощью метода DPPH и анализа антиоксидантной способности по методу FRAP, для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке и контрольных яблочных чипсов представлены в

таблице 3. Антирадикальная активность предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов продемонстрировала тенденцию к снижению с увеличением толщины материала. По сравнению с контрольным образцом для предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой яблочных чипсов значение антирадикальной активности увеличилось на 35,4, 32,1 и 11,8 % для 5, 7 и 10 мм соответственно. Это может быть объяснено ограниченной проницаемостью плазменного разряда для большей толщины яблочных чипсов. Характеристики плазмы, интенсивность, вид и тип были одними из факторов, влияющих на изменения антирадикальной активности [11]. Кроме того, более высокий антиоксидантный потенциал яблочной кожуры по отношению к ткани может дополнительно объяснить различия в антирадикальной активности после предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой в исследованных образцах.

Антиоксидантная способность стремится обеспечить кумулятивный эффект всех присутствующих антиоксидантов [45]. Параметр антирадикальной активности помогает продемонстрировать ингибирование реакций перекисного окисления липидов и эффективность, с помощью которой свободные радикалы могут быть очищены, а также степень предотвращения других окислительных повреждений [46]. В процессе предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой увеличение антирадикальной активности может быть

связано с утечкой биоактивных соединений на поверхность яблок, которые после этого испарились. Кроме того, на антирадикальную активность больше повлияла комбинированная предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой и ИК-сушкой, чем электрофизическая обработка импульсным электрическим полем. Мы придерживаемся этого мнения, потому что А. Wiktor и др. сообщили об увеличении антирадикальной активности на 10 % после обработки импульсным электрическим полем ткани яблока, тогда как А. Loureiro и др. сообщили о повышении антирадикальной активности на 80 % после предварительной обработки гранул Тукумы холодной плазмой [9, 47]. Кроме того, таблица 3 показывает, что, несмотря на ИК-сушку чипсов, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой, антирадикальная активность и антиоксидантная способность уменьшаются с увеличением толщины чипсов. Сравнивая образцы яблочных чипсов, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в инфракрасной сушке, и контрольных образцов, мы можем видеть сходную тенденцию антирадикальной активности, антиоксидантной способности и ТРС, что демонстрирует вклад фенольных соединений в антирадикальную активность. Кроме того, влияние ИК-сушки образцов с предварительной обработкой низкотемпературной атмосферной плазмой на ТРС, ТФС, антирадикальную активность и антиоксидантную способность демонстрирует, в какой степени биологически активные компоненты могут сохраняться по сравнению с контрольным образцом. Что касается антиоксидантной способности, высвобождение Fe^{2+} из источника термоэлектронной эмиссии в результате электрохимических реакций может способствовать повышению данного параметра [47, 48].

Характерные полосы в спектрах FT-IR. ИК-спектроскопия относится к числу надежных методов, используемых в аналитической и биоаналитической химии. Спектроскопия FT-IR, подходящая для анализа широкого спектра пищевых продуктов, обеспечивает быструю, чувствительную и простую процедуру выявления компонентов образцов без участия стадий предварительного концентрирования/разделения [49]. Спектры FT-IR предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-режиме яблочных чипсов (черная линия) (толщиной 5 мм) и контрольного образца (пунктирная линия) показаны на рисунке 7, на котором представлены различные идентифицируемые деформационные колебания и растяжения (пики) в различных областях. Учитывая полученные пиковые значения при ТРС (~ 889 мг/100 г) и ТФС (~ 462 мг/100 г массы) (табл. 3), для спектров FT-IR был выбран предварительно обработанный низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенный в ИК-сушилке яблочный диск толщиной 5 мм. Данные FT-IR согласуются с известными функциональными группами. Наблюдаемая область полосы FT-IR 2800–3000 cm^{-1} ассоциируется с растяжением связей NH_2 , $O-H$ и $C-H$, что связано с колебательными контурами свободных аминокислот, фенольных соединений, карбоновых кислот и углеводов [29]. Часто анализ наборов спектральных данных, генерируемых средствами FTIR, может быть сложным, что наблюдается в данном исследовании.

Кроме того, на рисунке 7 показано, что наблюдаемая область полосы FT-IR 1800–700 cm^{-1} характерна для флавоноидов и фенольных соединений. Наблюдаемый FT-IR 1600 cm^{-1} соответствует характеристике этерифицированных и неэтерифицированных карбоксильных групп в пектинах, на ко-

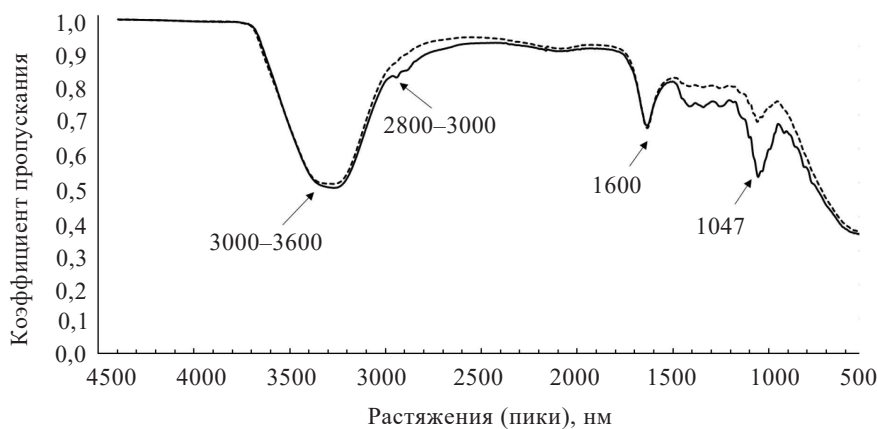


Рисунок 7. FT-IR спектры контрольного образца (пунктирная линия) и предварительно обработанных + высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов толщиной 5 мм (черная линия)

Figure 7. FT-IR spectra: control sample (dashed line) vs. 5-mm apple slices pre-treated with cold atmospheric gas plasma and IR-dried (black line)

торые может влиять деформационные колебания поглощенной воды, что может быть связано с вибрационным следствием C–C, O–H, C–H и C–O [30]. Количественные данные TPC и TFC (табл. 3) подтвердили амплитуды FTIR, наблюдаемые в этой области (1540–1175 см⁻¹). Авторы D. Wang и др. использовали FT-IR для подтверждения своих количественных данных TPC и TFC [16]. На рисунке 7 показан пик FT-IR при 1047 см⁻¹, который отображается как вибрация характерных групп в целлюлозе, что предполагает влияние небольшого количества полисахаридов. Некоторые полосы одного вещества будут перекрываться и находиться под влиянием полос в соседних положениях [30]. Пик FT-IR (рис. 7) ослабляется после предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой с ИК-сушкой. Это может свидетельствовать об увеличении интенсивности поглощения, образующегося за счет двух OH молекул воды, поглощенных целлюлозой. Данные ИК-спектроскопии предоставили дополнительную информацию, касающуюся химических изменений, происходящих в пределах толщины 5 мм предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой и высушенных в ИК-сушилке яблочных чипсов по сравнению с контрольным образцом.

Выводы

Провели исследование применения интеллектуальной технологии обработки низкотемпературной атмосферной плазмой для ускорения процесса сушки яблочных чипсов с сохранением качества получаемого продукта. Экспериментально установлено, что предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой в сочетании с ИК-сушкой влияет на кинетику сушки, цвет, биологически активные соединения и антирадикальную активность яблочных чипсов. Установлено, что применение обработки низкотемпературной атмосферной плазмой снижает удельное энергопотребление процесса сушки яблочных чипсов на 15–18 % в зависимости от толщины материала. Помимо сокращения времени сушки и уменьшения общего энергопотребления, предварительная обработка низкотемпературной атмосферной плазмой + ИК-

сушка влияет на цветовые характеристики, биологически активные соединения (TPC и TFC), антирадикальную активность и антиоксидантную способность. Большинство показателей качества продемонстрировали тенденцию к снижению с увеличением толщины материала для образцов, предварительно обработанных низкотемпературной атмосферной плазмой. Спектры FT-IR выявили изменения в биологически активных соединениях и биохимических реакциях, а также в механизмах, регулирующих взаимодействие между фенольными веществами и реакционноспособными видами плазмы.

Эти эффекты и гипотезы требуют дальнейших исследований. Процедура предварительной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой может быть рекомендована при производстве яблочных чипсов перед этапом сушки, учитывая факт последующего сокращения времени сушки и сохранения биологически активных соединений. Направление будущих исследований будет заключаться в изучении влияния других характеристик низкотемпературной атмосферной плазмы, таких как частота и скорость движения катода, на эффективность сушки и качественные характеристики яблочных чипсов, а также другой плодоовощной продукции.

Критерии авторства

М. Д. Соснин занимался проведением лабораторных экспериментов и расчетом основных показателей качества яблочных чипсов. И. А. Шорсткий руководил проектом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.D. Sosnin performed laboratory experiments, calculating the main indicators of the quality of apple chips. I.A. Shorstkii directed the project.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References/Список литературы

1. Amanor-Atiemoh R, Zhou C, Mujumdar A, Osaе R, Taiye Mustapha A, Wahia H, *et al.* Effect of simultaneous dual-frequency ultrasound aided ethanolic pretreatment on drying kinetics, bioactive compounds, antioxidant activity, and physicochemical properties of apple slices using pulsed vacuum dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 2020;43(11). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13535>
2. Samoylov AV, Suraeva NM, Zaytseva MV, Petrov AN. Bioassay of oxidative properties and toxic side effects of apple juice. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(1):176–184. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-176-184>.
3. Czernyszewicz E. Long-term trends in production and consumption of apples in Poland, Europe and worldwide. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. 2016;15(3):95–104.

4. Velickova E, Winkelhausen E, Kuzmanova S. Physical and sensory properties of ready to eat apple chips produced by osmo-convective drying. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(12):3691–3701. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0950-x>
5. Zielinska M, Ropelewska E, Zapotoczny P. Effects of freezing and hot air drying on the physical, morphological and thermal properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). *Food and Bioproducts Processing*. 2018;110:40–49. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.006>
6. Verboloz EI, Ivanova MA, Demchenko VA, Fartukov S, Evona NK. Ultrasound drying of rose hips: A process study. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(1):79–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-79-86>
7. Salehi F, Satorabi M. Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science*. 2021;21(1):519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
8. Bassej EJ, Cheng J-H, Sun D-W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;112:137–148. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.045>
9. Loureiro AC, Souza FCA, Sanches EA, Bezerra JA, Lamarão CV, Rodrigues S, et al. Cold plasma technique as a pretreatment for drying fruits: Evaluation of the excitation frequency on drying process and bioactive compounds. *Food Research International*. 2021;147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110462>
10. Wiktor A, Witrowa-Rajchert D. Drying kinetics and quality of carrots subjected to microwave-assisted drying preceded by combined pulsed electric field and ultrasound treatment. *Drying Technology*. 2020;38(1–2):176–188. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1642347>
11. Karim N, Shishir MRI, Bao T, Chen W. Effect of cold plasma pretreated hot-air drying on the physicochemical characteristics, nutritional values and antioxidant activity of shiitake mushroom. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(15):6271–6280. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11296>
12. Tappi S, Berardinelli A, Ragni L, Dalla Rosa M, Guarnieri A, Rocculi P. Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2014;21:114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.09.012>
13. Lammerskitten A, Mykhailik V, Wiktor A, Toepfl S, Nowacka M, Bialik M, et al. Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019;57. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102211>
14. Lv W, Lv H, Jin X, Cui Z, Su D. Effects of ultrasound-assisted methods on the drying processes and quality of apple slices in microwave drying. *Drying Technology*. 2020;38(13):1806–1816. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1666274>
15. Shalunov AV, Khmelev VN, Terentiev SA, Nesterov VA, Golykh RN. Ultrasonic dehydration of food products with moisture removal without phase transition. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):363–373. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373>
16. Wang D, Dai J-W, Ju H-Y, Xie L, Xiao H-W, Liu Y-H, et al. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer. *International Journal of Food Engineering*. 2015;11(5):701–711. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0002>
17. Shorstkij IA. Method for vegetal material preparation for drying and device for its implementation. Russia patent 2727915C1. 2020.
18. Shorstkii I. Application of cold filamentary microplasma pretreatment assisted by thermionic emission for potato drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102540>
19. Khudyakov DA, Sosnin MD, Munassar EMA, Techakanon C, Siemer C, Toepfl S, et al. Pulsed electric field processing as an effective tomato peeling method. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(1):189–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-189-198>
20. Petković M, Filipović V, Filipović I, Lukyanov A, Studennikova S, Mardasova EA. Modeling of carrot thin layer convective drying process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012046>
21. Liu Z, Song Y, Guo Y, Wang H, Wu Z. Influence of pulsed electric field pretreatment on vacuum freeze-dried apples and process parameter optimization. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2017;13(6):224–235. <https://doi.org/10.19026/ajfst.13.5160>
22. Miraei Ashtiani SH, Rafiee M, Mohebi Morad M, Khojastehpour M, Khani MR, Rohani A, et al. Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;63. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102381>
23. Arustamov VN, Ashurov KhB, Kadyrov KhKh, Khudoikulov IKh. Complex technology of vacuum-arc processing of structural material surface. *Technical Physics*. 2015;60(8):1208–1213. <https://doi.org/10.1134/S1063784215080022>
24. Wang J, Yuan X, Jin Z, Tian Y, Song H. Free radical and reactive oxygen species scavenging activities of peanut skins extract. *Food Chemistry*. 2007;104(1):242–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.11.035>
25. Faria GYY, Souza MM, Oliveira JRM, Costa CSB, Collares MP, Prentice C. Effect of ultrasound-assisted cold plasma pretreatment to obtain sea asparagus extract and its application in Italian salami. *Food Research International*. 2020;137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109435>
26. Roginsky V, Lissi EA. Review of methods to determine chain-breaking antioxidant activity in food. *Food Chemistry*. 2005;92(2):235–254. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.004>

27. Parniakov O, Rosello-Soto E, Barba FJ, Grimi N, Lebovka N, Vorobiev E. New approaches for the effective valorization of papaya seeds: Extraction of proteins, phenolic compounds, carbohydrates, and isothiocyanates assisted by pulsed electric energy. *Food Research International*. 2015;77:711–717. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.031>
28. Benzie IFF, Strain JJ. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*. 1996;239(1):70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
29. Amanor-Atiemoh R, Zhou C, Abdullaleef Taiye M, Sarpong F, Wahia H, Amoa-Owusu A, *et al.* Effect of ultrasound-ethanol pretreatment on drying kinetics, quality parameters, functional group, and amino acid profile of apple slices using pulsed vacuum drying. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;43(2). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13347>
30. Szymanska-Chargot M, Chylinska M, Kruk B, Zdunek A. Combining FT-IR spectroscopy and multivariate analysis for qualitative and quantitative analysis of the cell wall composition changes during apples development. *Carbohydrate Polymers*. 2015;115:93–103. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.039>
31. Enciso L, Gun M, Ruiz MS, Razzitte AC. Entropy in multifractal non equilibrium structures of dielectric breakdown. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2019;9. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/ab38bd>
32. Lin R, Xie B, Du C, Hang W, Huang B. Pulsed micro-discharge ambient ionization mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2018;434:123–129. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2018.09.011>
33. Zhang X-L, Zhong C-S, Mujumdar AS, Yang X-H, Deng L-Z, Wang J, *et al.* Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Food Engineering*. 2019;241:51–57. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.002>
34. Zhou Y-H, Vidyarthi SK, Zhong C-S, Zheng Z-A, An Y, Wang J, *et al.* Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration. *LWT*. 2020;134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110173>
35. Shorstkii I, Koshevoi E. Drying Technology assisted by nonthermal pulsed filamentary microplasma treatment: Theory and practice. *ChemEngineering*. 2019;3(4). <https://doi.org/10.3390/chemengineering3040091>
36. Wiktor A, Iwaniuk M, Śledź M, Nowacka M, Chudoba T, Witrowa-Rajchert D. Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*. 2013;31(1):112–119. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128>
37. Hnin KK, Zhang M, Mujumdar AS, Zhu Y. Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review. *Drying Technology*. 2019;37(12):1465–1480. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1510417>
38. Bußler S, Ehlbeck J, Schlüter OK. Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2017;40:78–86. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.007>
39. Tian W, Chen G, Gui Y, Zhang G, Li Y. Rapid quantification of total phenolics and ferulic acid in whole wheat using UV–Vis spectrophotometry. *Food Control*. 2021;123. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107691>
40. Ertekin Filiz B, Seydim AC. Kinetic changes of antioxidant parameters, ascorbic acid loss, and hydroxymethyl furfural formation during apple chips production. *Journal of Food Biochemistry*. 2018;42(6). <https://doi.org/10.1111/jfbc.12676>
41. Roobab U, Abida A, Chacha JS, Athar A, Madni GM, Ranjha MMAN, *et al.* Applications of innovative non-thermal pulsed electric field technology in developing safer and healthier fruit juices. *Molecules*. 2022;27(13). <https://doi.org/10.3390/molecules27134031>
42. Alam MR, Lyng JG, Frontuto D, Marra F, Cinquanta L. Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*. 2018;83(8):2159–2166. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14216>
43. Farias TRB, Rodrigues S, Fernandes FAN. Effect of dielectric barrier discharge plasma excitation frequency on the enzymatic activity, antioxidant capacity and phenolic content of apple cubes and apple juice. *Food Research International*. 2020;136. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109617>
44. Zou Z, Xi W, Hu Y, Nie C, Zhou Z. Antioxidant activity of *Citrus* fruits. *Food Chemistry*. 2016;196:885–896. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>
45. Hsieh C, Rajashekaraiiah V. Ferric reducing ability of plasma: A potential oxidative stress marker in stored plasma. *Acta Haematologica Polonica*. 2021;52(1):61–67. <https://doi.org/10.5603/AHP.2021.0009>
46. Wiktor A, Śledź M, Nowacka M, Chudoba T, Witrowa-Rajchert D. Pulsed electric field pretreatment for osmotic dehydration of apple tissue: Experimental and mathematical modeling studies. *Drying Technology*. 2014;32(4):408–417. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.834926>
47. Shorstkii IA, Yakovlev N. Experimental studies of a townsend discharge with a multi-point cathode on a dynamic platform of magnetically controlled Fe and Fe-Al particles. *Technical Physics*. 2021;91(8):1276–1285. <https://doi.org/10.1134/S1063784221080144>
48. Kumar K, Giehl A, Patz C-D. Chemometric assisted Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopic analysis of fruit wine samples: Optimizing the initialization and convergence criteria in the non-negative factor analysis algorithm for developing a robust classification model. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019;209:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.10.024>
49. Masek A, Chrzescijanska E, Kosmalka A, Zaborski M. Characteristics of compounds in hops using cyclic voltammetry, UV-VIS, FT-IR and GC-MS analysis. *Food Chemistry*. 2014;156:353–361. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.005>